אודיסאה

| מסע בין רעיונות |

גיליון מס' 17
אוקטובר 2012



מהו מדע?

"אודיסאה" יוצאת למסע מסחרי אל כוכבים רחוקים, עוצרת בשאלת חופש הבחירה, נוסעת עם הרכבת הקלה בירושלים, שואלת כיצד מפרשים ארכיאולוגים את הממצאים שלהם וחוזרת ארבע שנים אחורה – אל החיפוש והגילוי של החלקיק האלוהי במאיץ החלקיקים בסרן

מחיר לצרכן: 55 ₪ (כולל מע"מ)
254025512017
דאנאקוד 5645

מיסודה
ובתמיכתה של:

אודיסאה

"אודיסאה" ברשת – גולשים בין רעיונות



20 ש"ח בלבד על גיליונות קודמים 5–16
מבצע למנויים חדשים.

המבצע עד לתאריך 15/12/12 או עד גמר המלאי
מוגבל עד 10 עותקים.

www.odyssey.org.il

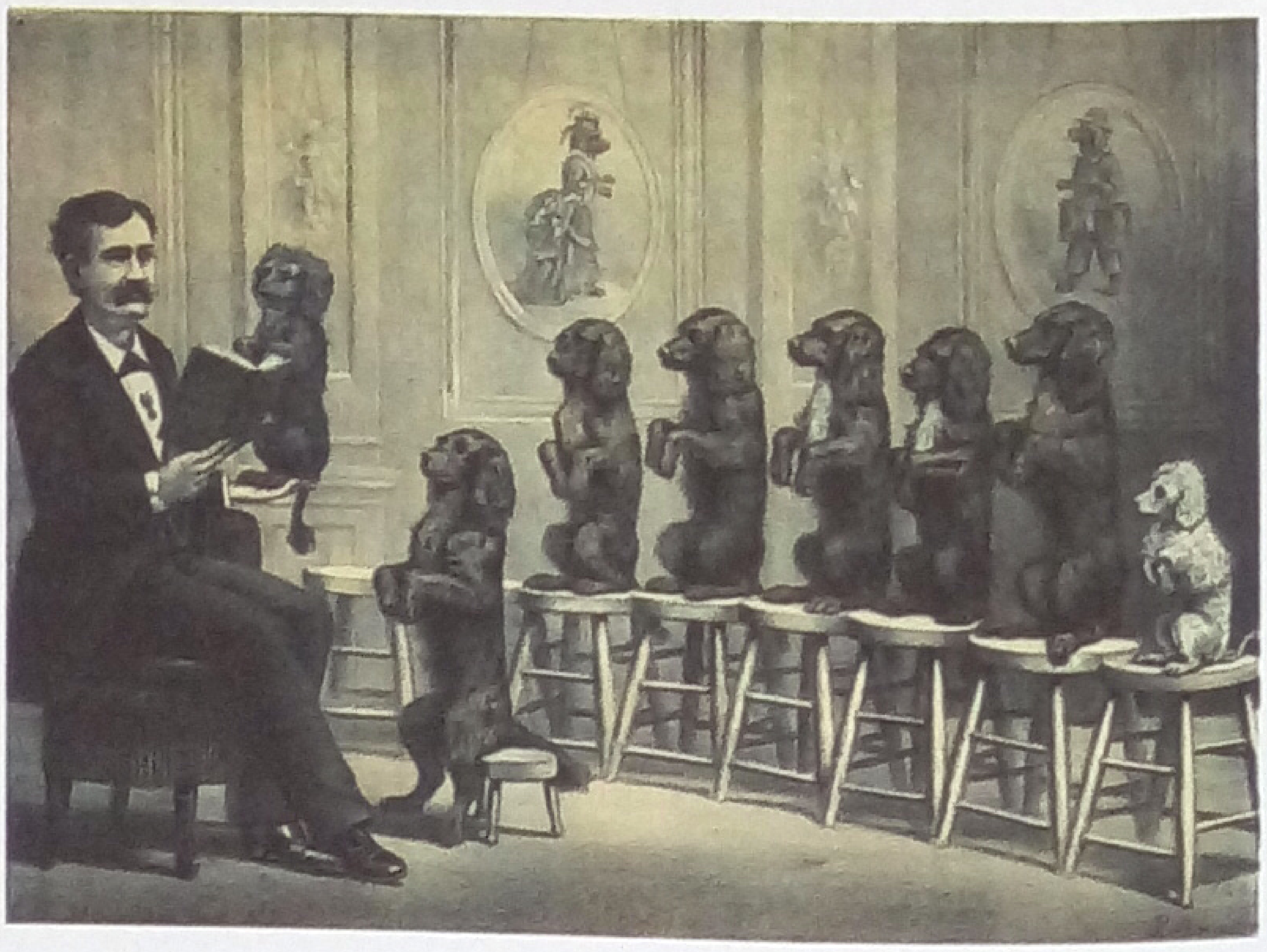
אתם מוזמנים להגיב, להתווכח, לשוחח עם הכותבים ועם קוראים אחרים;
לקחת חלק ביצירת "אודיסאה – מסע בין רעיונות"

ניתן לרכוש מנוי ישירות באתר

לרכישת מנוי באמצעות שירות הלקוחות הטלפוני חייגו: 03-9411621, 052-9993111

כנסיית השכל

האוניברסיטה היא מה שניתן לכנות בלשון נקייה "מוסד הוראה". במוסד כזה אדם מלמד ומלמד בלא כל שהות למחשבה [...] על אדם ללמד וללמד עד שמוחו נעשה קהה, יצירתיותו דועכת, והוא נעשה לאוטומט האומר שוב ושוב את **אותם דברים משעממים מול גלים בלתי פוסקים של סטודנטים חפים מפשע**, שאינם מבינים מדוע הוא משעמם כל־כך [...] זוהי דרך מתוחכמת לנהל בלי טורח מוסד להשכלה גבוהה, ובה בשעה ליצור את הרושם כאילו מוענק בו חינוך אמיתי.
האוניברסיטה האמיתית אין לה מיקום ספציפי, אין היא בעלת רכוש, אין היא משלמת משכורות והיא אינה מקבלת שום תמורה חומרית. **האוניברסיטה האמיתית היא כוח רוחני – אותה מורשת גדולה של חשיבה רציונלית, שנמסרה מדור לדור ושאינה קיימת במקום מוגדר כלשהו.** היא כוח רוחני המתחדש במהלך הדורות על־ידי קבוצת אנשים הנושאת באורח מסורתי את התואר פרופסור, אבל אפילו תואר זה אינו חלק מהאוניברסיטה האמיתית. האוניברסיטה האמיתית אינה אלא המסורת המתמשכת של השכל עצמו.
בנוסף לכוח רוחני זה – "השכל" – ישנה ישות פיזית הנקראת אוניברסיטה, אך היא למעשה דבר אחר לגמרי. זהו מוסד ללא כוונת רוח, זרוע של המדינה עם כתובת משלה. יש לה רכוש, יכולת לשלם משכורות ולקבל כסף [...] **אוניברסיטה זו אינה מלמדת, אינה מחוללת ידע חדש ואינה עוסקת בהערכתם של רעיונות ומחשבות. כמוה פשוט כבניין כנסייה, כמסגרת...**
יעדה העליון של כנסיית השכל הריהו תמיד יעדו הישן של סוקרטס – **חתירה אל האמת בצורותיה נטולות השינוי, כפי שהיא נגלית באמצעות תהליכי השכל.** הכול כפוף ליעד זה [...] לפעמים מתעורר ניגוד בין יעד זה לציבור האזרחים, כמו במקרהו של סוקרטס עצמו. אנשים מחבר הנאמנים או המחוקקים יכולים ללחוץ על ההנהלה ולאיים בקיצוצים, אם לא יאמרו הפרופסורים את מה שברצונם לשמוע [...] אנשי כנסייה אמיתיים חייבים לנהוג במצבים כאלו כאילו לא שמעו כלל את האיומים. הקהילה אינה, לדידם, יעד שיש לשרתו מעל הכול. **יעדם העליון הוא לשרת על־ידי השכל את תכלית האמת.** רוברט מ. פירסיג, "זן ואמנות אחזקת האופנוע", הוצאת זמורה ביתן



"כלבים משכילים", ליטוגרפיה של רותנגאטר, 1875,
מודפסת על־ידי מטרופוליטן פרינט, ניו־יורק. / דימוי: ויז'ואלפוטו

ועוד לא אמרתי הכול / נתן זך

וְעוֹד לֹא אָמַרְתִּי הַכֹּל
וְעוֹד יֵשׁ לִי מַה לּוֹמַר

לִפְנֵי שֶׁיִּהְיֶה מְאֻחָר וְהַקָּהָל יִתְפַּזֵּר
וְכָל אֶחָד יִהְיֶה זוֹכֵר

מַה שֶּׁכָּל אֶחָד זוֹכֵר כְּשֶׁאֲחֵרִים כְּלוֹ
לוֹמַר מַה שֶּׁאָמְרוּ וּמַה שֶּׁלֹּא אָמְרוּ.

וְעוֹד לֹא אָמַרְתִּי הַכֹּל.

מתוך: "שירים שונים",
הוצאת הקיבוץ המאוחד, 1974

אודיסאה

| מסע בין רעיונות |

דפוס: דפוס אלי מאיר / שקף אור

אמנים: ליו דינג, פליס וריני, אנה וברנהארד
בלום, טוקי ין, יוקיקו קיטהארה, יונס האנסן
וקלאס יאן מולמה

דימוי שער: אסנת פייטלסון, פרויקט:
Voyages Extraordinaires

מוציאים לאור:
"אודיסאה – מסע בין רעיונות"
מיסודן של: חברת "טבע",
האוניברסיטה העברית ירושלים

כתובת לפניות:
ת"ד 15055 רחובות 76150
odyssey@odyssey.org.il

מהו מדע?

מאז פרסם תומאס קון את ספרו המפורסם "המבנה של המהפכות המדעיות", חל שינוי מהותי בהבנת העבודה המדעית וביחס הציבורי אליה. היסטוריונים ופילוסופים של המדע הסבירו שמדע אינו אוסף של נוסחאות מתמטיות ותיאורים אמיתיים על העולם, אלא תהליך דינמי המושפע מפסיכולוגיה, סוציולוגיה, תרבות וכמובן כלכלה, של האנשים והארגונים העוסקים בעבודה המדעית.

קון פרסם את ספרו בעיצומה של תקופה שבה השתנתה גם תפיסת המציאות שלנו: המחשבה הפוסט־מודרנית נותנת את הטון, ומושג האמת איבד את קסמו. מאז למדנו שאוניברסיטאות אינן כנסיות של שכל אלא מקומות עבודה; שמדענים אינם סופרמנים החושפים את המציאות, אלא בני אדם המושפעים מסביבתם ומעברם; שתיאוריות שונות ואף מנוגדות יכולות להסביר את אותה תופעה; ושמתודה מדעית יעילה אינה יכולה להסביר כל תופעה.

חלק גדול מגיליון מס' 17 של "אודיסאה" עוסק בתהליכי העבודה המדעית ובשינויים שחלים במתודה המדעית וביחס אליה. מדע רציונלי היה ונשאר המפתח לקדמה אנושית ולהבנה טובה יותר של עצמנו, אלא שהמדע עצמו הולך ומשנה את שיטות עבודתו, ארגונו הפנימי, מעמדו התרבותי, ובעיקר את דימויו הציבורי. על חלק מתהליכים אלה תוכלו לקרוא בגיליון שלפניכם.

"אודיסאה – מסע בין רעיונות"

כתב־עת העוסק במחשבות, רעיונות, דילמות וויכוחים המתקיימים בחזית העשייה המדעית והפילוסופית העכשווית. כתב־העת מכוון ליצירת חיבור בין מדע לחברה ובין רעיונות לתוצאותיהם ולמשמעותם. חברת "טבע" מוציאה לאור את "אודיסאה" כחלק מפעילותה לקידום המדע והתרבות בישראל.

תוכן עניינים

פרופ' איתי ינאי וד"ר רועי צזנה





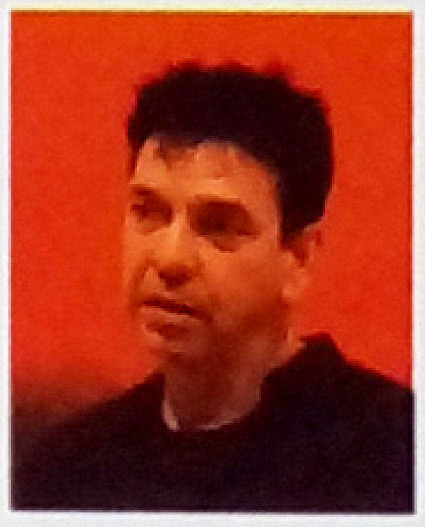
פרופ' ינאי הוא חבר סגל בטכניון בחיפה. עוסק במחקר בביולוגיה התפתחותית ואבולוציונית. תחומי המחקר שלו כוללים גישות שיטתיות לחקר רגולציה גנטית ברמת התא הבודד.
ד"ר צזנה הוא חוקר במרכז הבינתחומי לניתוח ותחזית טכנולוגית באוניברסיטת תל־אביב. כותב ומרצה בתחום המדע הפופולרי, בעל טור מדעי ב"סיינטיפיק אמריקן־ישראל", מגזין הטכניון ו"בלייזר". בעל בלוג בשם "מדע אחר" ומנחה תכנית הרדיו המדעית "דוקטור למה".

פרופ' רפי גרינברג



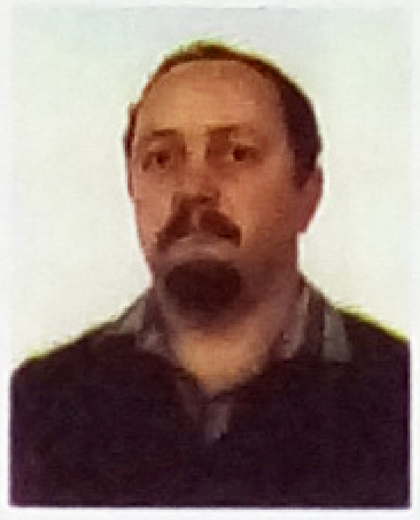
פרופסור לארכיאולוגיה באוניברסיטת תל־אביב. בין תחומי העניין שלו: ראשית התהוות התרבויות העירוניות באזורנו, הגירות קדומות ומגעים בין־תרבותיים, וכן המשמעויות של הארכיאולוגיה בהווה, במיוחד בעיר מגוריו, ירושלים.

פרופ' עילם גרוס



פרופסור במחלקה לפיזיקת חלקיקים במכון ויצמן למדע. בשנת 1991 סיים דוקטורט בפיזיקה ניסויית של אנרגיות גבוהות. שימש כעמית מחקר במרכז האירופי לחקר החלקיקים ב־CERN. מאוגוסט 2011 ריכז את החיפוש אחר החלקיק האלמנטרי בחוזן היגס ב־CERN, והוביל את קבוצת ההיגס בניסוי אטלס.

ד"ר נח ברוש



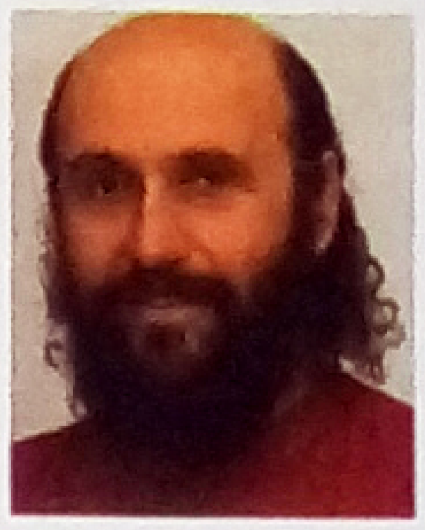
חבר סגל בחוג לאסטרונומיה ואסטרופיזיקה באוניברסיטת תל־אביב. חוקר ראשי בפרויקט טלסקופ החלל טאווקס בתחום העל־סגול ומנהל מצפה הכוכבים על שם וייז.

ד"ר טל הסנר



חבר סגל בכיר באוניברסיטה הפתוחה בתחום המתמטיקה. השלים את לימודי הדוקטורט במתמטיקה שימושית ובמדעי המחשב במכון ויצמן למדע, שם גם התמחה בחקר ראייה ממוחשבת. עוסק במחקר מִגוון רחב של בעיות בראייה ממוחשבת, למידה חישובית וזיהוי תבניות.

פרופ' מריוס אושר



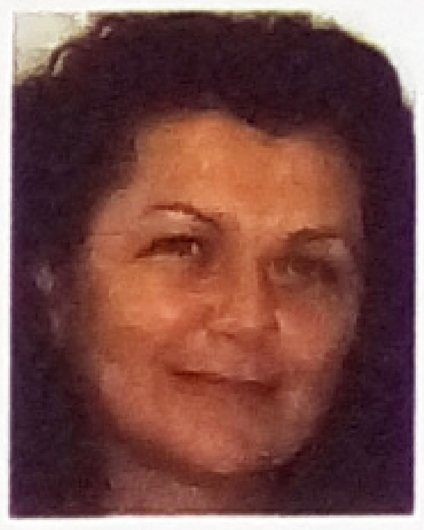
פרופסור לפסיכולוגיה קוגניטיבית באוניברסיטת תל־אביב. מחקריו עוסקים בתהליכים דינמיים של הכרה וקבלת החלטות ופילוסופיה של הכרה ורצון חופשי. לאחר שהשלים דוקטורט בפיזיקה באוניברסיטת תל־אביב עשה פוסט דוקטורט בפסיכופיזיקה במכון ויצמן למדע. כיהן כפרופסור לפסיכולוגיה באוניברסיטה של לונדון.

ד"ר עידו בצלת



מרצה בכיר באוניברסיטת בר־אילן בפקולטה למדעי החיים ומרכז הננוטכנולוגיה. תחומי המחקר המרכזיים שלו הם ננורובוטיקה, חישוב מולקולרי, תכונות חומרים, טכנולוגיה חינוכית וביו־ארכיטקטורה. בעל תואר בפרמקולוגיה מהאוניברסיטה העברית. המשיך ללימודי פוסט דוקטורט בהנדסה והנדסה ביולוגית.

פרופ' איריס ערבות



אדריכלית, מכהנת כפרופסור חבר בפקולטה לארכיטקטורה ובינוי ערים בטכניון וראש מסלול לימודי מוסמכים בארכיטקטורה ובינוי ערים. נושאי המחקר שלה כוללים פנומנולוגיה כתיאוריה של ארכיטקטורה ואורבניזם ומחקר פנומנולוגי של תופעות אדריכליות.

שמואל שם טוב

אובדן התשוקה

העולם משתנה, המדע משתנה, האדם משתנה. כולם מחכים להתעוררות האקדמיה

אם נכונה קביעתו של קרל מרקס כי "ההוויה קובעת את התודעה", הרי שאנו עומדים לפני שינוי מהפכני דווקא בתחום "מדע הרעיונות". ההוויה (הפיזית/כלכלית/ביולוגית) סביבנו משתנה בקצב מדהים, ואיתה משתנה הכרתנו ותודעתנו. לא צריך להיות מרקסיסט כדי להבין שהעולם נמצא בעיצומו של תהליך מהפכני, המתרחש בקצב שאיננו דומה לזה של אף מהפכה אנושית קודמת, ושתוצאותיה של המהפכה הנוכחית עשויות לשנות מן היסוד את האופן שבו אנו חושבים ומתנהגים.

כל שלב במעבר שעשתה הציוויליזציה – מליקוט לציד, מציד לחקלאות ולגידול בעלי חיים, ומשם לתעשייה קלה ומסחר ולבסוף לעידן התעשייה הכבדה, נמשך מאות ואלפי שנים עד להשלמתו. מהפכת הידע והטכנולוגיה שאנו חווים עתה את תחילתה, מתנהלת עשרות שנים בסך־הכול, וכבר ברור שהיא מתפתחת בקצב מעריכי ומכפילה את הישגיה מדי כמה שנים. לנוכח השינויים ברור שהתודעה והמחשבה האנושית אינן יכולות להישאר מאחור. הפילוסופיה של הרעיונות, ובמרכזה תורת ההכרה, חייבות לבצע התאמות ושינויים אל מול העולם החדש שבו נתנהל במאה הנוכחית.

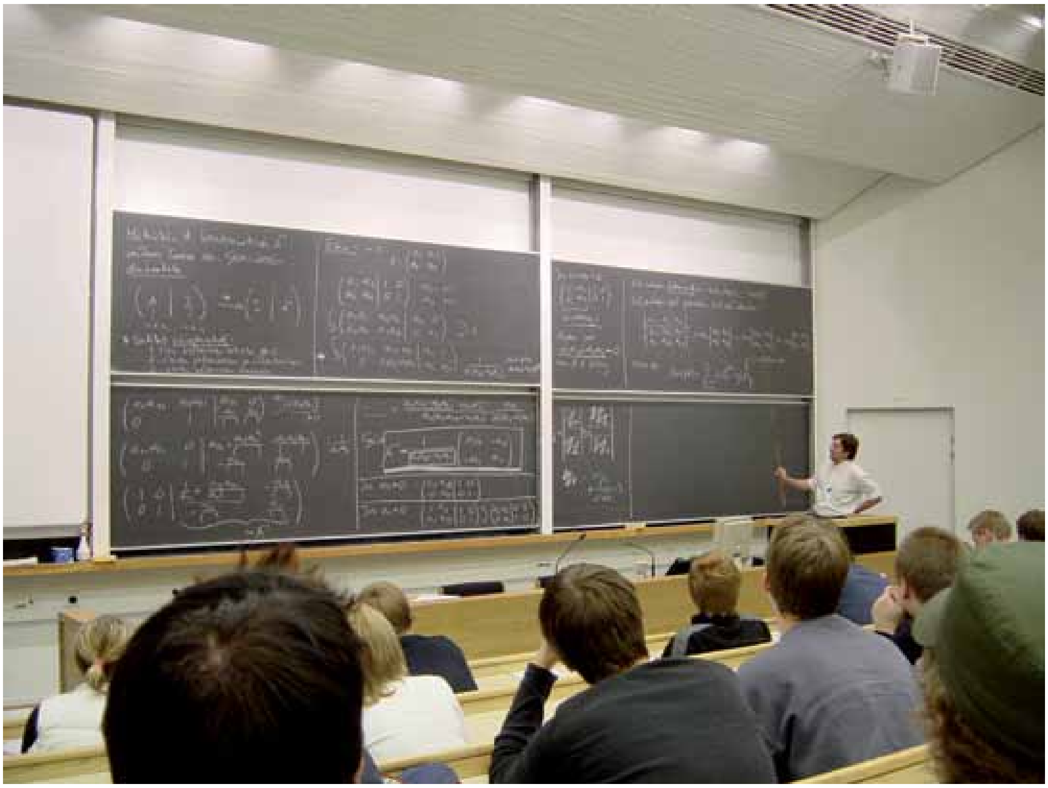
כ־500 שנה חלפו מאז החל המדע לדחוק את התיאולוגיה ולהשתלט על מה שסוקרטס הגדיר "תיאוריה של היש". הדת, כך התברר לכולנו, לא נכחדה ולא נעלמה, ואפילו לא איבדה מחשיבותה ומעוצמתה בקרב בני האדם. היא רק הואילה לפנות, לאחר מאבק עיקש, טריטוריות מסוימות למדע ולתבונה. בראש ובראשונה היא ויתרה, לפחות לזמן מה, על האחריות להסברת הטבע ודרך פעולתו. לרגע קט נדמה היה שהמדע יכול לשמש כתחליף דת לבני האדם. אבל עד מהרה התברר שמדובר באשליה. בני האדם נזקקים להרבה יותר מהסברים תבוניים כדי להגיע לקיום בעל משמעות ותקווה, והמדע לא התיימר, ואולי לא הצליח, לספק צרכים אלה.

קשה, אולי אף בלתי אפשרי, להצביע על הנקודה המדויקת שבה החל המדע – למרות כל הישגיו – לאבד את ההגמוניה על הובלת התרבות האנושית. אי־שם במחצית השנייה של המאה העשרים, כתוצאה מהתפתחויות בתחום ההוויה (בעיקר הקפיטליזם המזוקק בשיאו) ובתחום ההכרה (בעיקר הפוסט־מודרניזם הקיצוני), חל הפיחות במעמדו של המדע וביחס כלפיו.

שלושה מאפיינים בסיסיים של העידן המדעי ספגו את המכות הקשות ביותר: המחשבה הרציונלית, האוניברסיטאות הממוסדות ואנשי המדע. תערובת חדשה־ישנה של רעיונות רוחניים וחזרה אל חיק הדת החליפו את הפילוסופיה הרציונלית העומדת בבסיס המדע; האוניברסיטאות איבדו את ההגמוניה שלהן כמרכזי ידע, מקוריות ומהפכנות במחשבה, והמדענים הפכו מאייקונים של תרבות ו"מגלי האמת" לספקי תוכן מן השורה, שערכם כערך כל ספק אחר המביא תועלת צרכנית וטכנולוגית. ספק אם ניתן למצוא היום את משרת המדען (או הפרופסור, או המרצה באוניברסיטה) בעשירייה הראשונה של רשימת המקצועות המבוקשים בקרב בני נוער וצעירים.

ניצחונו המוחלט של הקפיטליזם הושלם במחצית השנייה של המאה העשרים, בד בבד עם הכרסום במעמדו של המדע. אין זה מקרה. השקפת העולם הקפיטליסטית הציבה בקדמת הבמה את הכסף כמדד חיוני, שלא לומר בלעדי, להצלחה. הידע, עבור החברה הקפיטליסטית, חשוב רק כאמצעי לעשיית רווחים, בני האדם נמדדים על־פי כמות הכסף ברשותם, וכל דבר בעל ערך (כולל הידע עצמו) ניתן לקנייה בכסף. מדענים מוצלחים הם, על־פי התורה הזאת, אלה שאפשר להפוך את רעיונותיהם לדולרים. זוכי פרס נובל נהנים, אמנם, מכבוד רב, אולם השאלה החשובה היא, כמה דולרים ניתן להפיק מהמצאותיהם.

השילוב בין קפיטליזם מזוקק למהפכת הטכנולוגיה והידע (אכן, אלה שתי מהפכות שונות הנכרכות כאן בכוונת מכוון בחבילה אחת) הנחית מכה קשה על האוניברסיטאות המוכרות, המבוססות על לימוד ומחקר. האוניברסיטאות, ששמרו על אופיין ועל דרכי פעולתן מאות שנים והשכילו בדרך מופלאה לשמור על מעמדן הייחודי, נלחמות היום על חייהן. הן חייבות לבצע שורה של פעולות והתאמות שבלעדיהן לא ישרדו.



סטודנטים בשיעור אלגברה לינארית, באוניברסיטת הלסינקי לטכנולוגיה / צילום: ויקישיתוף

השילוב בין שני הגורמים שהוזכרו לעיל יצר מערכת אקדמית שמתנהגת כמפעל כלכלי, תלויה בממנים ובפוליטיקאים לצורכי מחקר, נכשלת בניסיונותיה להתאים את עצמה לתהליכי הוראה מודרניים, ובעיני הצעירים, היא נתפסת כשלב הכשרה הכרחי בדרך לעבודה נחשבת או קריירה מוצלחת, ותו לא. צעירים נרשמים לאוניברסיטה כדי לסמן וי ליד הסעיף "השכלה אקדמית", וממילא מנהלים רבים בחברות עסקיות ובהיי־טק אינם רואים כלל בתעודה האקדמית קריטריון מרכזי בקבלת עובד חדש לעבודה. סוד גלוי הוא שמקצועות שאינם מאפשרים קידום תעסוקתי או כלכלי, הולכים ונעלמים מהאקדמיה. סטודנטים אינם נרשמים למחלקות המלמדות אותם, והאוניברסיטאות אינן מסוגלות, ואולי לא מעוניינות עוד, להמשיך ולקיים את מרכזי הידע הללו. במקום צצים כפטריות חוגים "סקסיים", המעשירים את קופת המוסד אך מדלדלים את המחשבה בו.

עגום לא פחות הוא מצבם של צוותי ההוראה והמחקר באוניברסיטאות. הסופר עמוס עוז מספר שבביקורו האחרון בסין שאלו אותו, איך ייתכן שלעם היהודי, המונה מיליונים ספורים של אנשים, יש מאות זוכי פרס נובל, בעוד שלמיליארדי סינים יש זוכים ספורים בלבד. עוז הציע את התשובה הבאה: בעבר, אמר, לכל ילד יהודי דתי שהתחנך בחדר הייתה משימה אחת חשובה בהגיעו לגיל מצוות: לבוא ולהציע "חידוש". התביעה הגלויה מהילד הייתה לא רק ללמוד ולשנן בעל־פה את כתבי הקודש, אלא להסיק מתוכם דבר־מה שיעיד על חשיבה נועזת ועצמאית, חידוש של פרשנות או של הבנת הטקסט. המקוריות זכתה לתגמול מיידי, ולמעשה הפקידה בידי הילד את המפתח לקידומו בישיבה. ברעיון הזה, אמר עוז, טמון גרעין המחשבה המקורית שהפכה את בני העם היהודי למובילים בתחומי המחשבה המדעית.

אלא שעולם הלימוד היהודי השתנה. במאתיים השנים האחרונות הוא מבוסס על שינון כפוי ושמרני של פרשנויות שאינן פתוחות כלל לחשיבה. החרדיות המסתגרת מכתיבה את הנורמה עד כדי כך, שכל מחשבה חדשנית נתקלת בחרמות ובנידויים, כמו, למשל, התלמוד המנוקד של הרב עדין שטיינזלץ, שהביא לשריפת ספרים. והנה, גם האוניברסיטה, האמורה לטפח תלמידים טובים ולהצמיח מהם מדענים מקוריים וחדשנים, פועלת היום במידה גדולה של קיפאון ושמרנות.

לפני ארבע וחצי שנים, כשהתחלנו לעבוד על הפקת כתב־העת "אודיסאה", קיימתי סדרת מפגשים עם אנשי אקדמיה בכירים בישראל. השיחות נועדו לאתר אילו שאלות נותרו פתוחות בדיסציפלינות שלהם, להבין מה הדילמות המעסיקות אותם, ולדרבן אותם לכתוב "מדע פופולרי" שיסביר את עבודתם ואת החידוש שהם מציעים בתחום הידע המרכזי שלהם.

אני מודה שהמציאות שנתקלתי בה עוררה בי הרהורים נוגים. פרופסורים בכירים ובעלי שם סירבו, בנימוס אך בהתמדה, להקדיש מאמץ וזמן לכתיבה מקורית ומחדשת. רובם העדיפו להפנות את המערכת לעבודות ולמאמרים שכתבו בעבר, והסבירו בשפה רפה שבעצם אין להם כרגע מה לחדש. קשה היה לי להשתחרר מהרושם שרובם מרגישים שכבר "עשו את שלהם", וממילא מעמדם האקדמי בטוח ומוגן, ואין להם צורך או רצון להיכנס להרפתקאות אינטלקטואליות חדשות. פה ושם היה צדיק אחד בסדום, אבל התחושה הכללית הייתה שרוב הפרופסורים שפגשתי איבדו (לאו דווקא בגלל גילם המבוגר) את התשוקה, את הסקרנות ואת חדוות היצירה.

אצל הדוקטורנטים והחוקרים הצעירים התמונה שונה. בגלל חרדה להמשך העסקתם וקבלת הקביעות הם משתדלים לרצות את הפרופסורים שלהם ולהתקדם במסלול הבטוח, שמציע

"אנשים מקוריים וחדשנים מחפשים, משום כך, דרכים אחרות, מחוץ לאקדמיה. מי שזקוק לסביבת עבודה מדרבנת, מלהיבה ותומכת ולאווירה של חדשנות; מי ששואף להשתייך לארגון המעודד העזה ומקדש את המתודה המדעית הישנה והטובה של ניסוי וטעייה, ימצא את מקומו במחוזות אחרים. בחממות הסטארט־אפ צומחים ממציאים מקוריים באין מפריע, חברות טכנולוגיות מקצות סכומי עתק להקמת סביבות עבודה למפתחים ולבעלי רעיונות חדשניים. נאס"א היא הגורם המוביל בחקר החלל, חברות תרופות פרטיות מובילות במחקר כימי וביולוגי, IBM מובילה את פרויקט 'המוח הכחול'"

המנחה או המומחה האקדמי המקובל בתחומם. דוקטורנטים רבים חוששים להעז ולהציע תיאוריות מהפכניות או חידוש לא מקובל. הגרוע מכול בעיניהם הוא אות הקלון "חוקר לא רציני", שמודבק בעקבות פרסום תיאוריה לא מבוססת או לא ממוסמכת מספיק, או תזה שהזרם המרכזי דחה בעבר. החשש להיות מסומן כ"חוקר לא רציני" מנע מעשרות דוקטורים צעירים שפניתי אליהם להעלות בכתב רעיונות מקוריים ולא מקובלים. מי שהעז, למרות הכול, לומר דבר־מה חדשני, לא חדל להעמיס על טיעוניו שורות ארוכות־ארוכות של מראי מקום וציטוטים, כדי שלא יואשם חלילה בניסיון לקבוע חידוש שאיננו מקובל.

מסיבות שונות ומייגעות הממסד האקדמי לובש עתה אופי שמרני עד כדי הגזמה, מטפח עקרונות של גילדה סגורה ומנותק במידה גדולה מהחברה ומהתרבות שבהן הוא מתפקד וחי. התוצאה – בינוניות, אינטריגות ואווירת נכאים בתוך האקדמיה, ויחס מזלזל כלפיה מבחוץ. ברבים מן החדרים והמסדרונות חסרות מאוד ההתלהבות, הסקרנות והתשוקה האופייניות כל־כך לסביבה המדעית. הקירות האפורים, המרצפות העגומות והחדרים השבלוניים משקפים היטב את התכנים והאווירה.

אנשים מקוריים וחדשנים מחפשים, משום כך, דרכים אחרות, מחוץ לאקדמיה. מי שזקוק לסביבת עבודה מדרבנת, מלהיבה ותומכת ולאווירה של חדשנות; מי ששואף להשתייך לארגון המעודד העזה ומקדש את המתודה המדעית הישנה והטובה של ניסוי וטעייה, ימצא את מקומו במחוזות אחרים. חממות הסטארט־אפ, למשל. שם צומחים ממציאים מקוריים באין מפריע. חברות טכנולוגיות מקצות סכומי עתק להקמת סביבות עבודה למפתחים ולבעלי רעיונות חדשניים. נאס"א היא הגורם המוביל בחקר החלל, חברות תרופות פרטיות מובילות במחקר כימי וביולוגי, חברת IBM מובילה את פרויקט "המוח הכחול", ועוד.

לכל אלה יש, למעשה, שם אחד: הפרטה מדעית. זהו תהליך אדיר, המתרחש בימים אלה בכל העולם. וכשרוב המדענים המקוריים חייבים למקד את פעילותם בשוק הפרטי או בשירות הממשלתי כדי לקדם מחקר מקורי ופיתוח חדשני – פעילותם האוניברסיטאית הופכת להיות שולית וזניחה.

המהפכה מתחוללת אפוא בכל מקום, פרט למקום שבו היא אמורה להתחולל. המדע והטכנולוגיה מתפתחים בקצב מדהים, העולם משתנה לנגד עינינו, ואילו האקדמיה, שאמורה להיות מרכז התרבות המדעית והקדמה האנושית, שוקעת ומאבדת את מעמדה כ"מנוע הצמיחה" של האינטלקט האנושי. דומה שבאקדמיה לא מבינים את עומק המשבר ואת עוצמת ההתאמות והשינויים הנדרשים מהאוניברסיטאות, כדי להחזיר למדע את ערכו, ולאקדמיה – את מעמדה כמקום שבו הדעת והידע אינם אמצעים, אלא המטרה עצמה.

בספרו האחרון "הסינגולריות מתקרבת", שיצא לאחרונה לאור בתרגומו לעברית של עמנואל לוטם, כותב אחד האנשים המקוריים והחדשנים ביותר בתחומי הידע המודרני, ריי קורצווייל, כי אין די בכך שהאקדמיה תשנה את אופייה ואת שיטות עבודתה. עלינו להבין, הוא טוען, שהמדע עצמו עובר שינוי מהותי. בשיחה

(מומצאת אך מבוססת על שיחות אמיתיות) בינו לבין ביל גייטס, הוא מסביר מהו המדע העתידי (סוג של שילוב בין דת ומדע): חיבור בין טכנולוגיה מהפכנית לבין בינה אנושית מפותחת.

ביל גייטס: מה שמוצא חן בעיני ברעיונותיך הוא שהם מעוגנים במדע, אבל האופטימיות שלך קרובה לאמונה דתית...

ריי קורצווייל: כן. אנו זקוקים לדת חדשה. התפקיד העיקרי של הדת היה רציונליזציה של המוות, מכיוון שעד עתה לא היה שום דבר של ממש שיכולנו לעשות בעניינו.

גייטס: מה יהיו עקרונות הדת החדשה?

קורצוייל: מוטב לדבוק בשני עקרונות: האחד מהמסורת הדתית, והשני מן המדע והאמנות החילוניים. מן הדת המסורתית ניקח את כיבוד התודעה האנושית.

גייטס: ואהבת לרעך כמוך.

קורצוייל: בדיוק. מערכות המוסר והמשפט שלנו מושתתות על כבוד לתודעת הזולת. אם אני פוגע במישהו, זה נחשב לא מוסרי ואולי גם לא חוקי...

גייטס: והעיקרון החילוני?

קורצוייל: לקוח מן האמנות והמדע – והוא **חשיבות הידע**. ידע הוא יותר ממידע. ידע הוא מידע הנושא משמעות לישויות מודעות: מוזיקה, ספרות, מדע, טכנולוגיה. אלה הן איכויות העתידות להתרחב עקב המגמות שאני מדבר עליהן.

אני יודע שמדובר כאן בשפה "רוחנית" ולא מדעית, הנשמעת מעט כמו ניו־אייג' מזויף. אלא שקורצווייל מבסס את התיאוריה הסינגולרית שלו על התפתחות מדעית ומחשבתית, על טכנולוגיה חדשנית ועל שינוי התודעה האנושית כתוצאה מכל אלה. הפיזיקה המודרנית, בעצם המדע המודרני כולו, משנים את שפת הדיבור ואת הלכי המחשבה, ומשלבים בשיח המדעי שאלות שעד לא מזמן נחשבו בלתי לגיטימיות בגלל עיסוקן ב"רוח" ואפילו באמונה. כפי שמסכם ריי קורצווייל: **המהפכה הטכנולוגית וההתמזגות בין בינה אנושית וטכנולוגיה הן מהלך שהופך את האבולוציה הביולוגית שהכרנו על־פיה, אחת ולתמיד.**

לפני ארבע שנים יצאנו לדרך עם "אודיסאה" במטרה לקרב בין מדע לחברה, בין מדעי הטבע למדעי החברה והרוח, בין אקדמאים לאמנים ויוצרים, בין טכנולוגיה לפילוסופיה ובין רעיונות לתוצאותיהם. את צעדינו הראשונים ליוו דאגה ותחושה שהנתק בין הציבור הרחב לבין אנשי המדע הולך ומתרחב, ושחשוב, אם כך, לחזק את המחשבה המדעית־רציונלית בשיח החברתי. ארבע שנות עבודה כעורך "אודיסאה" חיזקו אצלי את תחושת המשבר ואת חשיבות המפעל הקטן שבנינו. אין ספק בעיני כי במאה העשרים ואחת יוסיפו וייטשטשו ביתר שאת הגבולות בין המציאות לבין הדימוי, בין הדת לבין הפילוסופיה, בין הרציונליות לבין המיסטיקה, בין הרוח לבין החומר, בין בני האדם לבין המכונות החושבות ובין החברה לפרטים המתקיימים בתוכה. טשטוש הגבולות הזה הוא הרה־סכנה, אך הוא טומן בחובו גם סיכוי לדבר־מה חדש: ההבנה שאנו הולכים ומתקרבים לנקודה שבה יתגלה בפנינו סוף־סוף הסבר כולל ומקיף של ההוויה האנושית.

חלק גדול מהנושאים בגיליון זה עוסקים בתיאוריה של המדע ובעבודה מדעית, על רקע השינויים שהצגתי בפתח דברי. **פרופ' איתי ינאי וד"ר רועי צזנה** חוזרים ושואלים, איך מתקדם איש מדע בחקירה המדעית, מה מקור ההיפותזות, ומה עושה לנו מהפכת המידע ברשת ובמחשבים. **פרופ' רפי גרינברג** מנתח את דפוסי העבודה של ארכיאולוגים ומדגים, עד כמה משפיעים רעיונות והיפותזות על פרשנות הממצאים שמתגלים בשטח. **פרופ' מריוס אושר** מציע דרך נוספת לטיפול בשאלת הרצון החופשי, דרך שתאפשר לנו להמשיך ולאחוז בשני קצות המקל: דטרמיניזם וחופש פעולה. **פרופ' עילם גרוס** סוקר שנים של אובססיה מדעית סביב גילוי חלקיק ההיגס, מהרגע שיצא לדרך ועד לתגלית הגדולה ביותר של השנה האחרונה. **ד"ר טל הסנר** מזכיר לנו שוב את קיומן של גיאומטריות לא־אוקלידיות, המתארות את העולם באופן שונה משהכרנו ומאפשרות לנו לבצע ראייה ממוחשבת באמצעות מצלמות ומחשבים חדישים. **ד"ר נח ברוש** מציג לנו את העידן החדש של נסיעות מסחריות לחלל, חלק מתהליך ההפרטה הטכנולוגית שיעביר את כובד המשקל מנאס"א לחברות פרטיות, ואשר מקרב אותנו אולי לעידן של התיישבות אנושית בכוכבים רחוקים.

כל אלה ועוד בגיליון 17 של "אודיסאה". זהו הגיליון האחרון שאני עורך. מהגיליון הבא ואילך אפנה את מקומי לעורך חדש. אנו חיים בעולם שסוע ומנוכר, תחת איומי טרור ופחד משואה גרעינית, עולם שמיליוני בני אדם נמקים בו מעוני וגוועים מרעב, שמתקיים בו ניצול בלתי נסבל, שנוהגת בו בזבזנות אקולוגית משחיתה המקרבת את כולנו לכיליון, ושכסף ואלימות שולטים בו ללא מצרים. דווקא משום כך אני עדיין נושא את עיני אל המדענים ואל המדע, אל אנשי הרוח ואל האקדמיה, אל החוקרים והממציאים. את תקוותי לעולם טוב יותר אני תולה באותם אנשים המבינים כי ידע ורעיונות הם המפתח לקדמה. אותם בני אדם היודעים כי למרות כל השינויים המתרחשים בעולמנו, המדע היה ונשאר היצירה המופלאה ביותר של המוח האנושי, ועל כן הוא טומן בחובו את הסיכוי הגדול ביותר לשגשוג בעתיד.

שמואל שם טוב הוא עורך ומייסד "אודיסאה"
ומנכ"ל מרכז הספר והספריות בישראל



איתי ינאי ורועי צזנה

השקר הלבן של המדע

הגישה המקובלת בעולם המדעי היא, שתחילה החוקרים מעלים השערה, ובהמשך מנסים לאשש אותה באמצעות בדיקות ותצפיות. פרופ' איתי ינאי וד"ר רועי צזנה מסבירים מדוע מדובר למעשה "בשקר לבן", וטוענים שראוי להם למדענים להפסיק לצוד היפותזות ולהתחיל לדוג אותן מתוך האוקיינוס של הנתונים

"המאמר המדעי הוא תרמית..." (פיטר מדאוור)

כיצד מצליחים מדענים לחשוף את סודות הטבע? איך הם מגיעים לתובנות חדשות? בעולם המדע מקובלת הגישה, לפיה המדען מעלה רעיון – היפותזה – בנוגע לדרך שבה אמור הטבע להתנהג, ולאחר מכן בודק אותה במעבדתו במשך שנים ארוכות. זהו "מדע על בסיס היפותזות", והמדענים הנוקטים גישה זו מכנים עצמם "ציידים" וטוענים, כי הם רודפים באופן אקטיבי אחר אישושה או הפרכתה של השערה מסוימת.

בכך הם שונים ממתי־המעט המכונים "דייגים", אשר מסננים פריטי מידע חשובים ומעניינים מתוך האוקיינוס של הנתונים הקיימים כיום, כפי שנעשה, למשל, במיפוי הקוד הגנטי האנושי. הקהילה המדעית מתייחסת ברובה בבוז מסוים כלפי הדייגים. אולם, התבוננות מעמיקה באופן שבו הגיעו חוקרים רבים לגילוייהם הלכה למעשה מראה, כי המלך הוא עירום, וכי הקהילה המדעית – רובה ככולה – מסלפת את האמת בנוגע לדרך המובילה לתגליות מדעיות חדשות.

הסיפור הבא מוכר היטב לכל מדען ומנהל מעבדה במדעי החיים. סטודנט צעיר מתחיל בלימודי הדוקטורט שלו. הוא מלא בהתלהבות: מוכן לממש את הידע שרכש בשנות לימודיו באוניברסיטה, לגלות את התגליות הגדולות ולכתוב את הפרקים הבאים בספרי הלימוד האקדמיים.

ואז הוא נכשל.

הכישלון, כמובן, אינו מגיע מייד. הסטודנט שלנו נכנס למעבדה עם שאלת מחקר ברורה, חדשנית ומנוסחת היטב. הוא אוסף את הנתונים בעמל וביזע, עושה ימים כלילות ליד שולחן הניסויים, מקבץ את התוצאות שקיבל ובודק את המשמעות הסטטיסטית שלהן. מקץ חודשי עבודה מרובים הוא מגלה שהניסויים אינם מניבים תוצאות עקביות, וששאלת המחקר עשויה להיות פשטנית מדי ביחס לנושא שבחר. אז מגיע שלב הדכדוך העמוק, המלווה בדרך־כלל בשיחה נוקבת עם בת־הזוג, שמלכתחילה אמרה תמיד שהוא יכול להרוויח טוב יותר בתעשייה. אבל הסטודנט שלנו אינו מתייאש בקלות שכזו. הוא מנסח מחדש את שאלת המחקר שלו, אוסף נתונים, מקבץ תוצאות, בודק מובהקות סטטיסטית – ומתאכזב שוב. ושוב ושוב ושוב. הנושא אינו פשוט כפי שחשב – או כפי שהקהילה המדעית כולה סברה עד לאותו יום. פעמים רבות הקושי אינו טכני. הבעיה היא שהוא מנסה לבחון את הנעשה בכוס מים אחת, בעודו שקוע בבעיה בסדר גודל של אוקיינוס שלם.

<<

מימין – סיפור מדעי טוב: אביר יוצא לדרך להציל את הממלכה מדרקון. הוא דוהר במורד הדרך, מוצא את הדרקון, ולאחר קרב קצר קוטל את המפלץ וזוכה בידה של הנסיכה השבויה / איור: אוסנת פייטלסון

<< הסטודנט כבר שוקל להפסיק את לימודיו – ורבים אף עושים כך – ואז הוא מזהה פרט מפתיע. החיידקים אינם מתנהגים כפי שהיו אמורים להתנהג בצלחת הפטרי. וזה מעניין. זה חדש. זה לא צפוי. ואם אותו סטודנט ניחן ב"נפש המוכנה לקבל את ההזדמנות", כדברי לואי פסטר, הרי שהוא ימקד את כל תשומת לבו בתפנית יוצאת הדופן הזו, יחקור אותה ויגיע למסקנות חדשות, שמעולם לא תועדו בספרות המדעית עד לאותו רגע.

עליז ומאושר כותב הסטודנט מאמר אודות התגלית ומגיש אותו למנחה לביקורת. במאמר הוא מתאר את כל הניסיונות הכושלים הקודמים, את מפח הנפש ואת הדרכים ללא מוצא בהן ניגף עד לתגלית הלא־צפויה. המנחה עובר על המסמך ביעף, מקמט את הטיוטה ואת מצחו בזעף ומסביר לסטודנט את עובדות החיים באקדמיה: במאמרים צריך לשקר.

מאמר, הוא מסביר, מתאר סיפור עם התחלה, אמצע וסוף, אלא שהכתיבה הממשית מתבצעת מהסוף להתחלה. ראשית צריך הסטודנט לעבור על התוצאות שהוא מעוניין להציג בסוף המאמר, ורק אז עליו לנסח את שאלת המחקר – כלומר, ההיפותזה – שהיה עליו להעלות, אילו היה יודע אילו תוצאות יקבל. הלוגיקה ברורה: אין טעם להתעכב בפרטים על כל סימטה ללא מוצא, כשאנו יודעים שהיריעה בעיתון קצרה וזמנם של הקוראים דחוק. אמנם מדובר בשקר המסלף את דרך ההגעה לתגלית, **אבל כך נוהגים כולם**.

השקר הלבן של המדע

המדע כיום מבוסס על העלאת היפותזות. היפותזה הינה ניחוש מלומד, שמנסה להסביר את המנגנונים הפועלים מאחורי תופעה קיימת. התקדמות המדע מתנהלת באמצעות בחינת ההיפותזה במעבדה – אנו מטיחים אותה בטבע, מתיכים אותה בלהבת הבנזן, מרצפים את הדנ"א שלה, ובסופו של דבר מחליטים האם יש בסיס סביר להפרכתה או לאישושה. זוהי השיטה המדעית בכללותה המתקיימת בכל תחומי המדע – מפיזיקה קוונטית ועד לסוציולוגיה אבולוציונית – וזה סיפור ממש טוב.

האמת, כרגיל, מסובכת יותר ומסודרת פחות.

כמעט תמיד ההיפותזה אינה השלב הראשון בתהליך, והיא גם אינה מופיעה שלמה יש מאין במוחו הקודח של החוקר. היא מסתמכת בעצמה על שלב מחקר מקדים, המספק את הנתונים הנחוצים לגיבושה. למרות זאת, רוב החוקרים סבורים שזהו אינו סיפור נאה מספיק, ולכן הם בוחרים, כדבריו של זוכה פרס נובל, הגנטיקאי הצרפתי פרנסואה ז'קוב, בספרו (1988) "The Statue Within", להחליף את הסדר האמיתי של האירועים והתגליות במה שנראה כסדר ההגיוני – זה שהיה צריך לעקוב אחריו אילו המסקנות היו ידועות מלכתחילה".

למיטב ידיעתנו, לא נעשה מחקר שבחן את שכיחות האידיאליזציה של תהליך המחקר, אך מניסיוננו האישי, משיחות בין עמיתים ומעדויות בכתביהם של מדענים חשובים כז'קוב וכפיטר מדאוור (בספרו 1990 ,"The Threat and the Glory"), אנו מתרשמים כי מדובר בתופעה נפוצה ביותר. רוב המדענים אינם רואים בהתנהגות מסוג זה שקר, אלא בחירה מודעת בסגנון הכתיבה הנדרש לפרסום מאמרים ומחקרים. הם מאמינים שהמדע מתקדם באמצעות העלאת היפותזות והפרכתן, אך סקירה היסטורית מדגימה כי המציאות אינה מצייתת תמיד לחוקיות זו.

חוכמת הדייגים

מאין מגיעה היפותזה חדשה? סיפורי התהוותן של מספר תיאוריות מדעיות חשובות ומפורסמות עשויים לענות על השאלה. בגיל 22 יצא חוקר טבע צעיר בשם צ'ארלס דרווין למסע מסביב לעולם. לאורך המסע הוא אסף מגוון עצום של בעלי חיים, מאובנים ואבנים, אותם שלח בחזרה לאנגליה. רבות מהדגימות שצבר במסע לא נועדו לתמוך בהיפותזה מסוימת או להפריכה, אלא היו אקט של איסוף כמעט אובססיבי של כל הנקרה בדרכו. רק כאשר חזר לביתו מקץ מספר שנים החל דרווין לקטלג את כל הדגימות הביולוגיות שאסף במסעותיו, ולהתייעץ עם חוקרים אחרים אודותיהן. בזמן זה, למשל, הוא גילה, כי טובי הביולוגים בדורו סבורים כי הפרושים (סוג של ציפור שיר) שאסף באיים השונים אינם משתייכים לאותו מין ביולוגי כפי שחשב. גילוי זה הביא להעלאת היפותזה חדשה, לפיה הפרושים הגיעו במקור מאקוודור לאחד האיים, ומשם התפשטו לאיים שונים ועברו שינויים מורפולוגיים שעיצבו מחדש את המקור שלהם לפי תנאי הסביבה. דרווין עסק בעיקר באיסוף נתונים, ורק מתוך בחינת מכלול הנתונים התקבלה היפותזה חדשה. עבודת המחקר קדמה להיפותזה.

דרווין אינו לבד במערכה. בשנת 2002 זכה סר ג'ון סולסטון בפרס נובל, ביחד עם שני עמיתים למחקר, על גילוי מתג ההשמדה <<

משמאל – סיפור מדעי אמיתי: אביר אמיץ יוצא לדרך אל הלא־נודע. ארנקו נופל לבור. הוא קופץ לבור, שולף את הארנק מהבוץ ומצליח לצאת. עולה בחזרה על הסוס, אך הסוס מקבל דלקת ריאות. הוא מנסה למכור את הסוס בשוק, ללא הצלחה; אין קונים. תוך כדי שיטוטים הוא שומע על דרקון, וסבור שקטילתו עשויה לקדם את סיכוייו לקביעות אצל בת המלך. כשהוא רכוב על סוסו המשתנק והמחרחר, מגיע האביר לפתח מאורת הדרקון ומגלה שהדרקון כבר מת. האביר קוטל אותו, שוב, חוזר לעיר ומוצא על הרצפה חרק שאיש לא זיהה לפניו. הוא מפרסם את דבר התגלית, זוכה לתהילת עולם ומוזמן לכנסים רבים מספור של חוקרי חרקים (והנסיכה? היא התחתנה בינתיים עם אביר פחות הרפתקן) / איור: אוסנת פייטלסון



"המצב הקיים כיום מקדם כתיבת הצעות מחקר אשר נקראות כ'סיפור טוב', אך מבוססות על רמייה שאינה מכבדת את המדען או את הציבור המממן מכספי המסים את המחקרים. כך נוצרת גם תדמית לא מציאותית של המדע בעיני הקהל הרחב. המדע נתפס בעיני הציבור כתהליך סיסטמתי, קר ושקול, בעוד שהמדענים עצמם יודעים, כי תהליך הגילוי המדעי דומה יותר לאמנות בשלב גיבוש ההיפותזות מתוך הנתונים"

<< העצמית (מוות תאי מתוכנת – אפופטוזיס) הקיים בכל אחד מתאי הגוף. אם היינו מגיעים למעבדתו של סולסטון 27 שנים לפני כן, היינו מוצאים אותו כפוף מעל המיקרוסקופ, יום אחר יום, שנה אחר שנה, כשהוא ממפה את תבנית ההתפתחות של עובר תולעת מקבוצת הנמטודות – פעולה שקשה להצדיק אותה מראש בכל סוג של היפותזה בעלת משמעות לאדם. הנמטודה הנחקרת, מסוג Caenorhabditis elegans, בוקעת מהביצה כשבגופה 558 תאים בדיוק. מספר תאים זה קבוע ואינו שונה מתולעת לתולעת מאותו מין. סולסטון עקב אחר הביצית המופרית של התולעת, כאשר זו התחלקה לשני תאים, ארבעה תאים, שמונה תאים וכן הלאה, ומיפה את גורלו של כל תא ותא – מי לשריר, מי למערכת העיכול, מי למערכת העצבים, וכן הלאה.

המתמטיקאים בינינו יזהו כבר פרדוקס בסיפור: כיצד ייתכן שתא אחד מתחלק לשניים, ושניים לארבעה, וארבעה לשמונה וכן הלאה, אך מספר התאים הסופי בגופה של הנמטודה הצעירה אינו בחזקה של שתיים? התשובה העיקרית לכך, כפי שגילה סולסטון במפתיע ולגמרי בלי כוונה, היא, שחלק מהתאים של כל אחת מהנמטודות מתוכנת מראש להתאבד במהלך הגדילה. בכל אחד מהעוברים מתים בדיוק אותם תאים, באותו זמן ובאותו מנגנון. אותו מנגנון פועל גם אצל בעלי החיים העיליים, כולל בני האדם. מנגנון זה אחראי על הרווחים שבין אצבעותינו, על עיצוב צורתו של כל איבר ואיבר בגוף, והוא אף מספק הגנה מפני תהליכים סרטניים המתחוללים בגוף.

תגליתו של סולסטון, כמו זו של דרווין או (להבדיל) של הסטודנט הצעיר בתחילת המאמר, לא הייתה צפויה כלל בתחילת המחקר, והוא הגיע אליה לא מתוך היפותזה שהוגדרה מראש, אלא בעקבות שלב איסוף נתונים מעמיק, יקר וממצה.

עקב מורכבותן של המערכות שאנו חוקרים, כיום, אולי יותר מבעבר, קיים צורך בכינון שלב איסוף נתונים רציני על מנת לגבש היפותזות חדשות וחדשניות. פרויקט הגנום האנושי מהווה דוגמה טובה לדרך חשיבה זו: הפרויקט עלה למשלם המסים האמריקאי שני מיליארד דולרים, מבלי שתעמוד מאחוריו היפותזה מגובשת אחת. ועם זאת, תוצרי הפרויקט משמשים היום להעלאת אלפי היפותזות חדשות, ולאישוש או שלילה של היפותזות קיימות. ריצוף הגנום האנושי לימד אותנו כי אנו ניחנים בעשרים אלף גנים, ולא במאות־אלפים, כפי שהיו סבורים בעבר. הוא לימד אותנו שהקוד הגנטי גדוש במקטעים שהגיעו במקור מווירוסים טפיליים, את דפוס האבולוציה של האדם מהקוף הקדום, ועוד מגוון של תגליות שמעטים חשבו עליהן בעבר. חלק גדול מההיפותזות שאנו מעלים היום, הן פרי שלב איסוף הנתונים העצום המכונה פרויקט הגנום האנושי. כל הפרויקט הזה היווה למעשה הרפתקה אחת גדולה, שרבות מתוצאותיה לא נצפו מראש והובילו לפיתוח היפותזות חדשות וחדשניות. פרויקט הגנום האנושי היה "מסע דיג" בתקציב ענק, במהלכו נצבר ים הנתונים שלתוכו משליכים עכשיו מדענים את חכותיהם בתקווה לגלות היפותזות חדשות.

דוגמאות אלו מבהירות כי יש צורך בשלב איסוף נתונים על מנת לפתח היפותזות חדשניות. חלק חשוב מעבודת המדען הינו בדיקת היפותזות, אך אלו חייבות להגיע מתוך זיהוי תבניות בנתונים שהושגו בשלב מוקדם יותר. למרות זאת, רוב המדענים מתארים את תהליך היצירה המדעית דווקא מהכיוון ההפוך ומכנים כל דרך מחקר שאינה מבוססת על העלאת היפותזות קודם לניסוי, בשמות שהם רואים כשמות גנאי – "מדע תיאורי", "מסעות דיג", "נטול היפותזה", ועוד. אילו הייתה התנהגות כזו פוגעת רק ביושרתם של

המדענים, ניחא. הבעיה היא שאנו מאמינים, שלנתיב פעולה זה קיימות השלכות מזיקות של ממש על הציבור והקהילה המדעית.

שאלה של כסף

מחקרים עולים כסף. זוהי עובדת חיים בסיסית. הכסף הולך על תשלום משכורות ומלגות לחוקרים, רכישת ציוד מעבדה יקר, תחזוקה שוטפת של המעבדה, ועוד. כדי לקבל את הכסף, חוקרים באקדמיה מגישים בקשות למענקים כספיים, שמגיעים מממשלות ומגופים בינלאומיים כמו האיחוד האירופי. הבקשות אשר מצליחות לזכות במימון, נכתבות גם הן לפי המתכון הידוע והקלסי של "היפותזה ואישושה/הפרכתה". ההשערה העומדת מאחורי דרך פעולה זו היא, שמחקר שאינו מתבסס על היפותזה מקדימה לא יוכל להגיע לתוצאות, ומכיוון שכך אינו ראוי למימון. אלא שהאמת הכואבת היא שכדי לגבש היפותזה מקדימה, יש צורך בבסיס נתונים ראשוני (preliminary results) שמצדיק את בחינתה. איסוף ראשוני זה של הנתונים אינו ממומן רשמית, ולמעשה מתבצע כמעט ברמייה על חשבון המענקים הקודמים.

מאז ימי דרווין ועד היום עלות איסוף הנתונים הולכת וגדלה, בד בבד עם רמת הסיבוכיות של הטכנולוגיות הדרושות לתהליך. המשמעות היא שאימוץ שיטת החשיבה של היפותזה ואישושה/הפרכתה, שאינו שם מספיק דגש על שלב איסוף הנתונים, פוגע בהתקדמות המדע, בעיקר כאשר המחקר נערך במעבדות קטנות בעלות תקציב מוגבל. כפי שאמר חוקר הביולוגיה הידוע אלחנדרו סנצ'ז אלווראדו, "אני סבור שמענקים ניתנים היום לציידים, ולא לחוקרים" ("The Scientist", 2012).

המדענים כיום נאלצים לכתוב הצעות מחקר, המוצגות כאילו הן מבוססות על היפותזות שברצונם לבדוק. האמת היא שמרגע קבלת המענק הכספי המחקר מתקדם בכיוונים משלו, בדרך להשגת התוצאות והתובנות המעניינות והחדשניות ביותר, ותוך זניחת ההיפותזות המקוריות שהובטחו בהתחלה. למעשה, סביר להניח שמעטים מאוד מהמחקרים שמומנו מכספי מענקים, התקדמו בדיוק כפי שהובטח בהצעה. זה מצב טוב, מכיוון שכפי שאיינשטיין עצמו אמר, "אם היינו יודעים מה אנחנו עושים, זה לא היה נקרא מחקר!"

המצב הקיים כיום מקדם כתיבת הצעות מחקר אשר נקראות כ"סיפור טוב", אך מבוססות על רמייה שאינה מכבדת את המדען או את הציבור המממן מכספי המסים את המחקרים. כך נוצרת גם תדמית לא מציאותית של המדע בעיני הקהל הרחב. המדע נתפס בעיני הציבור כתהליך סיסטמתי, קר ושקול, בעוד שהמדענים עצמם יודעים, כי תהליך הגילוי המדעי דומה יותר לאמנות בשלב גיבוש ההיפותזות מתוך הנתונים. תדמית זו היא האחראית לציפיותיו הלא־ריאליות של הסטודנט מתחילת המאמר, והיא חקוקה גם במוחותיהם של תלמידים שמתחילים את הקריירה שלהם, ואינם מבינים עדיין שהמאמרים בעיתונות המדעית מספקים רק הצצה סלקטיבית לתהליך המחקר – "ממש כאילו היה אדם כותב היסטוריה של מלחמה, כשהוא מסתמך רק על הידיעות הרשמיות לעיתונות שפרסם המטכ"ל", כדברי ז'קוב.

אתגר למדע הישראלי

מענקים כספיים להצעות מחקר ניתנים בהכרח על סמך הבטחות המבוססות על היפותזות. החוקר המגיש את הצעת המחקר מפרט את ההיפותזה שהוא מעוניין לאשש או להפריך, ואת התוצרים הפרקטיים של הגשמת מטרה זו. באופן טבעי, המענקים ניתנים בעיקר להצעות מחקר מסוג זה, מכיוון שהבוחנים מעוניינים לקדם את ההצעות הנראות מועילות וחשובות ביותר – ואלה מבוססות בהכרח על היפותזות קיימות.

זוהי שיטה הגיונית לבחינת הצעות מחקר, וברור שחלק נרחב מהתקציב צריך לזרום להצעות שנכתבו בסגנון זה – ולו רק מכיוון שקשה לחשוב על דרך אחרת להחליט איזו מההצעות חשובה יותר או פחות. עם זאת, בדרך זו אנו צפויים להחמיץ חלק מפריצות הדרך שיתקבלו מ"מסעות דיג" וממחקרים שאינם תלויי היפותזות. מכיוון שכך, אנו מציעים למשרד המדע הישראלי "ניסוי בשטח": העבירו חמישה אחוזים מהמענקים במדעים השונים לנתיב שאינו מבוסס על היפותזות מקדימות או מחייב אותן.

מחקרים אפשריים בנתיב זה עשויים לכלול פרויקטים גדולים שיניבו עושר עצום של נתונים. מכיוון ששני כותבי המאמר הנוכחי מגיעים במקור מתחום מדעי החיים, אנו מביאים מספר דוגמאות אפשריות מעולם זה: מיפוי רמת הביטוי של כל גן בתאים מסוימים לאורך ההתפתחות האנושית, אפיון וקיטלוג של דרך הקיפול של כל החלבונים בתא אנושי, זיהוי כל המיקרו־אורגניזמים במעיים של תינוק שנולד זה עתה ולאורך השנה הראשונה של חייו, ועוד. הנתונים שיופקו ממחקרים מסוג זה יהיו מספיק מעניינים כדי להעלות שפע של היפותזות חדשות, שיצדיקו את המאמץ.

תנו לנו לחקור בלי היפותזות, בלי כבלים מזויפים שנשית על עצמנו כדי לחנוק את היצירתיות שלנו; בלי שקרים, לבנים או בכלל, ונראה כמה פריצות דרך ייצאו מכאן.

רפי גרינברג

יצרני העבר

ח.ל. בורחס מציג באחד מסיפוריו קריקטורה של ארכיאולוגים המעצבים את העבר ואף מפיקים את תגליותיהם בהתאם לציפיות ולתשוקות. פרופ׳ רפי גרינברג טוען כי הקריקטורה הזו אינה רחוקה מהמציאות ומסביר כיצד ארכיאולוגים, מיגאל ידין ועד ימינו אנו, מייצרים דימוי של העבר, כדי שיתאים לסיפור אותו הם מבקשים לספר על ההווה

מַה שֶׁעָשׂוּי הָיָה לִהְיוֹת הוּא הַפְשָׁטָה
נוֹתָר כְּאֶפְשָׁרוּת מַתְמֶדֶת
רַק בְּעוֹלָם שֶׁכֻּלּוֹ הַשְׁעָרוֹת.

ט.ס. אליוט, ״ארבעה קוורטטים – ברנט נורטון״. תרגום: אורי ברנשטיין

עבור חברה חילונית־מערבית האוחזת בתפיסה קווית של הזמן, העבר הוא דבר ההולך ומתרחק, ורק באימוץ הזיכרון אנחנו יכולים להציל משהו מהשכחה. הפחד שלנו מפני השכחה הוא מצמית: אנו מקימים כנגדה אינספור הגנות – ספרי זיכרון, אוטוביוגרפיות, מוזיאונים, אנדרטאות וארכיבים.

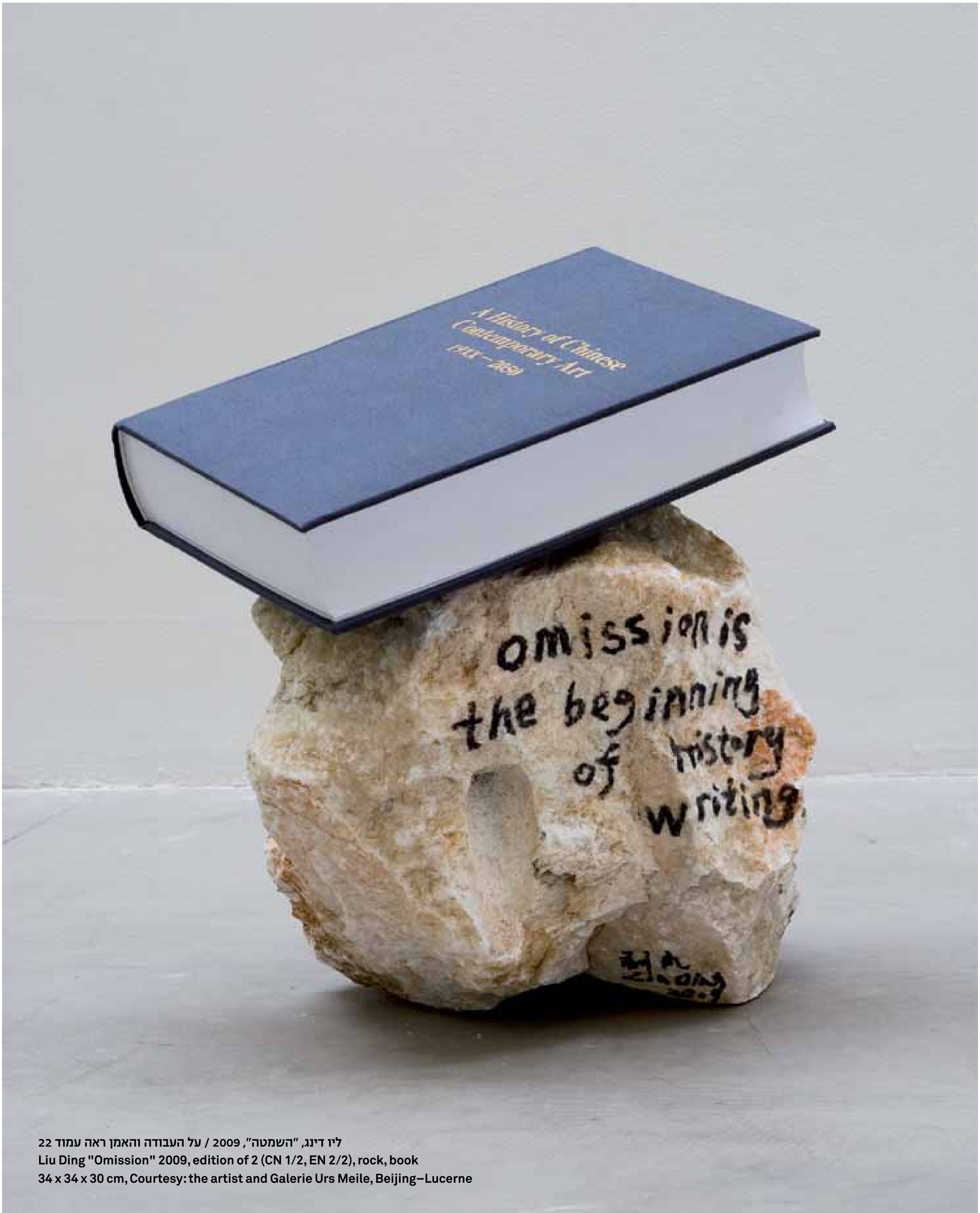
אובדן הזיכרון האינדיבידואלי, אם מפאת טראומה ואם מפאת מחלה, משול לאובדן הזהות עצמה. חרדת אובדן הזהות מוצאת ביטויים קולעים במיוחד בתרבות הפופולרית. לדוגמה, בתיאורי חוויית האובדן הקוגניטיבי בספריו המרתקים של ד״ר אוליבר סאקס (״האיש שחשב שאשתו היא כובע״, ״התעוררויות״), או במוטיב החוזר של אובדן השליטה בזיכרון המופיע בספרות המדע הבדיוני של פיליפ ק. דיק ובעיבודים הקולנועיים לרעיונותיו (״בלייד ראנר״, ״זיכרון גורלי״).

גם במישור הקיבוצי העבר הוא מסד הזהות המשותפת, ומוזיאונים וארכיונים הפכו זה כבר לחלק הכרחי של כל מפעל לאומי. בספרו המונומנטלי על זיכרון, ״La Mémoire, L'Histoire, L'Oubli״ (בעברית: ״הזיכרון, ההיסטוריה, השִכחה״), מזכיר לנו הפילוסוף פול ריקר, כי בכל חברה מרובת רבדים מגויסים הזיכרון וההשכחה להצדקת מבני הכוח הקיימים. לפניו כבר טען הסוציולוג היהודי־צרפתי מוריס הלבוואכס, כי כל זיכרון הוא ביסודו זיכרון קולקטיבי: אנו זקוקים לאחרים על מנת לזכור. מכאן ברור כי היכולת לעצב זיכרון של אחרים מעניקה לבעליה עמדת כוח, וכי במישור החברתי, עבודת הזיכרון היא ביסודה עבודה ערכית־פוליטית.

היות הזיכרון בסיס לזהותנו בהווה יוצרת פרדוקס מעניין: האספנות והאוצרות המודרניות, יותר משהן מכוונות להכרת העבר, מתייחסות אל ההווה ומפנות מבט קדימה אל העתיד. אנו בוחרים וממיינים את שרידי העבר, על מנת לשמר את אלה שעליהם נייסד עתיד טוב יותר, יפה יותר, מתאים יותר לציפיותינו מעצמנו.

מבין הצורות השונות של איחוי הזיכרון תופסת הארכיאולוגיה מקום מיוחד, בהיותה תחום המייצר את חומרי הגלם שלו ומפרש אותם. כאשר אנו שומעים על תגלית מסוימת – ארמונו של דוד המלך, קברו של פיליפוס ממקדוניה או שרידי סעודתו של האדם המודרני הראשון – מקופלים בדיווח שני מהלכים מורכבים: רצף הפעולות שהובילו להגדרת אוסף חפצים כלשהו כ״גילוי״, והפרשנות הנלווית ל״גילוי״, שבה נעוצה פעולת איחוי הזיכרון. שני המהלכים נטועים בתוך הקשרים מוסדיים, חברתיים ואישיים, המעניקים

>>



ליו דינג, "השמטה", 2009 / על העבודה והאמן ראה עמוד 22
Liu Ding "Omission" 2009, edition of 2 (CN 1/2, EN 2/2), rock, book
34 x 34 x 30 cm, Courtesy: the artist and Galerie Urs Meile, Beijing–Lucerne

>> לחפצים שבמוקד את ערכם. לעתים הקשרים אלה דומיננטיים עד כדי כך, שהם מעלימים את החפץ העומד כביכול במרכז. כלומר, עוצמת הרצון והצורך ביצירת הזיכרון היא זו שמייצרת את ה"גילוי" (בדומה להולוגרמה, הקיימת רק בזכות האנרגיה של מחולליה). בלעדיהם – מתברר שאין ל"גילוי" קיום כלל.

התגליות הארכיאולוגיות ממלאות את עולמנו ומספקות רקע והצדקה לשורה ארוכה של אידיאות, עמדות מדיניות, תפיסות של זהות ונורמות התנהגות. הן מעניקות תשתית מדעית לתיאוריות על יחסים מגדריים, לתפיסות עולם הרואות בקונפליקט – או, לחלופין, בשיתוף – יסוד קבוע בהתנהגות חברתית, לטענות אתניות ולאומיות על זכויות היסטוריות, ואף לביסוסן של אמונות דתיות. לכן, מן הראוי שכאנשים חושבים, נצטייד בכלים ביקורתיים שאיתם נוכל לשפוט את התוקף ואת המטען הערכי של תגליות אלה.

שניים מחפשים עיפרון

בסיפורו "טלן, אוקבר, אורביס טרטיוס" מפליא הסופר הארגנטינאי חורחה לואיס בורחס להגדיר, על דרך המשל הסאטירי, את סכנותיה של האשליה הארכיאולוגית. הסיפור עוסק בנושאים החביבים על בורחס – האפשרות לפיצולה של המציאות למסלולים מקבילים וגמישותו של הזמן. טלן, על־פי המסופר, הוא כוכב דמיוני, המיוצג בעולמנו על־ידי הכרך האחד־עשר של האנציקלופדיה הכללית שלו. בכרך זה נכתב, כי החיים בטלן כפופים לחלוטין לתפיסה אידיאליסטית. והגיעו הדברים לידי כך, שחפצים אינם אלא מטפורה לפעולות או לתכונות, ולא מיוחס להם קיום עצמאי. גם הזמן חסר רציפות, ו"העבר חסר ממשות אלא כזיכרון בהווה".

אין זה מפליא אפוא, ששנים ארוכות של אידיאליזם כבר החלו לעצב את המציאות בטלן. בחלקים העתיקים ביותר של הכוכב שכיחה הכפלתם של חפצים אבודים: שניים מחפשים עיפרון. האחד מוצא, אך אינו אומר דבר. השני מוצא אף הוא עיפרון, לא פחות ממשי, המתאים יותר לציפיותיו. לחפצים המשניים הללו, שקיומם הוא פרי הרצון בלבד, ניתן השם "הרניר" (hrönir).

נקודת מוצא זו מוכרת לכל ארכיאולוג: שניים (או יותר) מחפשים משהו שאבד – אתר היסטורי קדום, שדה קרב עתיק, או הוכחה לתיאוריה כרונולוגית כלשהי. ממצאיהם (תמיד מוצאים משהו!) מורכבים מהמוני פרטים קטנים. כל פרט כזה הוא כמו חלק מפאזל, שאת תמונתו מעולם לא ראו. אבל על פאזלים כבר אמר הסופר ז'ורז' פרק (בספרו "החיים הוראות שימוש"), כי אפשר להסתכל על כל חלק במשך ימים שלמים, ולא להתקרב כלל לפתרון. צריך דימוי כלשהו של התמונה השלמה, כדי להכניס סדר בחלקים הבודדים.

הדימוי אפוא הוא הציפיות. כשם שבכוכב טלן מוצאים שני המחפשים עיפרון, כך גם בעולמנו רבים הם אלה המוצאים את מה שחיפשו. כאשר שניים טוענים למציאת אותה אבידה, ההכרעה תהיה, על־פי רוב, לטובת הממצא שעונה בצורה משכנעת יותר על הציפיות. בחלק שלנו של העולם, בעל ההיסטוריה הארוכה, הציפיות לרוב נוצרות על בסיס טקסטים קדומים, וההכרעה – על־פי ההתאמה הטובה ביותר לטקסט.

דוגמה אופיינית מהזמן האחרון היא גילויו מחדש של "גן המלך" בירושלים בשני מקומות שונים: בנחל קדרון, על־פי חופרי "עיר דוד"; וברמת רחל, על־פי חופרי רמת רחל. כדי לשכנע, כל צד מביא ראיות לכך שהמקום שבו הוא חפר מתאים בצורה מובהקת יותר לציפיות על־פי הטקסט המקראי. כמו במקרה העיפרון של טלן, גם במקרה של "גן המלך" מתקיימים עתה שני החפצים (או, ליתר דיוק, שני המקומות המדומים) זה לצד זה, ומייצגים שתי אפשרויות אלטרנטיביות (בורחס היה אומר, שתי התפצלויות של המציאות).

הממצאים הם פרי התשוקה

בטלן, בינתיים, גילו ארכיאולוגים את הפוטנציאל הטמון בחפצים המשוכפלים:

"מנהל של אחד מבתי־הכלא של המדינה הודיע לאסיריו, שבאפיקו הקדום של נהר אחד מצויים קברים מסוימים והבטיח להוציא לחופשי את מי שיביאו לתגלית חשובה. בחודשים שלפני החפירה הראו להם תצלומים של מה שהם עתידים למצוא. הניסיון הראשון הזה הראה שתקוות ולהיטות עשויות להכשיל; שבוע של עבודה באתים ובמכושים לא הביא לחשיפת hrön כלשהו זולת גלגל חלוד, מתאריך מאוחר לזמן הניסוי. הניסוי נשמר בסוד, ולימים חזר עליו בארבעה בתי־ספר. בשלושה היה הכישלון כמעט מוחלט; ברביעי (שמנהלו מת באקראי במהלך החפירות הראשונות) **חשפו – או הפיקו – התלמידים מסיכת זהב, חרב ארכאית, שניים או שלושה כדי חימר, ואת גוו קטוע הגפיים מכוסה־הירוקת של מלך עם כתובת על החזה שטרם הצליחו לפענחה** [...] **הפיתוח השיטתי של ה"הרניר"** [...] **עשה גדולות למען הארכיאולוגים. הוא איפשר לחקור ואף לשנות את העבר, שעכשיו אינו נופל מן העתיד בגמישותו ובצייתנותו"** (ח.ל. בורחס, "טלן, אוקבר, אורביס טרטיוס". תרגום: יורם ברונובסקי, עם תיקונים קלים על־פי המקור).

הייתכן שגם בעולמנו פועלים ארכיאולוגים על־פי שיטת עמיתיהם בטלן? נראה שאכן כך, ולא מדובר רק בשוליים הסהרוריים, ואף לא במקרי זיוף מפורסמים. אף שתיאורו של בורחס הוא ללא ספק קריקטורה, זו קריקטורה המצביעה על תופעה קיימת. כמו בדוגמה של "גן המלך", גם במקרים שאביא להלן מדובר בארכיאולוגיה

"ארכיאולוגים מייצרים זיכרונות. בבואם אל שרידי העבר, הם בוחרים את אלה שהם בעלי משמעות, או שאפשר להרכיב מהם משמעות על־ידי איסופם מחדש. זהו תהליך של בחירה ומיון, שבו בוחרים במורשת – כלומר, מחליטים מה בעבר ראוי לשימור, לזכירה, להורשה לדורות הבאים, ומה אין לשמור, לזכור או להוריש. פעולות האיסוף, שימור הזכר וההורשה הן פעולות כנגד השכחה; ריפוי של פגעי הזמן. בכל הפעולות הללו מפעילים הארכיאולוגים שיקול דעת, הנובע מתפיסה לגבי מה שחשוב וראוי לזכירה ולשמירה. זוהי אומנותם"

ההולכת בעקבות טקסטים קדומים, אולם לא חסרות דוגמאות מהארכיאולוגיה הא־טקסטואלית, המראות כיצד חפירות משמשות להגשמת מאוויים.

הדוגמה המוכרת יותר לקוחה מחפירות יגאל ידין במצדה. כידוע, מצדה שופעת ממצאים המעידים על התעוזה והתבונה של בוניה, ואף על המערכה הרומית להכנעתה. אולם ידין ביקש יותר: הוא רצה למקם את ממצאי החפירה בתוך המיתוס הישראלי של מצדה, המבוסס על תיאוריו ההרואיים של יוסף בן מתתיהו (יוספוס פלביוס) את ההתנגדות וההתאבדות של קנאי מצדה בימיה האחרונים. אימות כתביו של בן מתתיהו, ייאמר כאן במאמר מוסגר, הוא אחד הפרויקטים המרכזיים של הארכיאולוגיה הישראלית, והוא המניע למפעלי חפירה רבים ברחבי הארץ, מגמלא שבגולן ועד מבצרי מדבר יהודה וירושלים. חלק מרכזי במסכת ההתנגדות הוא פרשת ההתאבדות של מגיני ההר, הכוללת אלמנטים דרמטיים רבים: נאום אלעזר בן יאיר, הטלת הגורלות, ההתאבדות עצמה והניצולים הבודדים שנשארו לספר את הסיפור.

במחקרו המפורט על חפירות ידין, העוקב אחר תגליות החפירה כפי שתועדו בזמן אמת, מראה הסוציולוג נחמן בן יהודה, כיצד עברו ממצאי החפירה מטמורפוזה במחשבתו של ידין, תוך כדי העבודה ולאחריה. הדוגמה הבולטת ביותר היא תיאור גילויים של שרידי שלושה שלדים במדרגה התחתונה של הארמון הצפוני: גבר ואישה צעירים, ונער בגיל מבוגר מדי מכדי שיוכל להיות בנם. גילוי חלקי השלדים לא עורר תחילה התרגשות מיוחדת, הואיל והם נמצאו בחלק מבודד של המבצר, ללא עדות ברורה לנסיבות מותם. אולם עם הזמן, ידין הוסיף לסיפור נדבכים של פרשנות ודרמה:

"לפתע עמדנו פנים אל פנים מול הרגעים האחרונים והטרגיים ביותר של מצדה הלוחמת", הוא כותב ב"מצדה: בימים ההם בזמן הזה", ספרו הפופולרי על חפירות מצדה. בנאום בשנת 1973 הוא כבר קובע, כי הממצא היה של "מפקד חשוב ביותר, אשתו ובנו – בדיוק כמתואר על־ידי יוסף בן מתתיהו". לא מיותר להזכיר שידין הכשיר דורות של תלמידים, ומורשתו ממשיכה להתקיים בתוך הארכיאולוגיה הישראלית, המקדשת את החוקר הכריזמטי בעל ההשערות הנועזות, שמסוגל לספק ראיות חותכות לכל טענה.

באותה תקופה שבה פעל ידין בחצור ובמצדה, פעל ארכיאולוג ישראלי צעיר אחר בערי הנגב העתיקות עבדת וממשית. היו אלה שנות כהונתו של דוד בן־גוריון כראש ממשלה, כאשר "הפרחת השממה" עמדה בראש סדר העדיפות הלאומי. אברהם נגב, לימים פרופסור לארכיאולוגיה באוניברסיטה העברית, החל לחפור בשנות החמישים את ערי הנגב ונחשב במשך שנים רבות כבר־סמכא בכל הנוגע לנבטים (שבטים מדבריים שמוצאם בצפון ערב). עבודת מחקר חדשה של מנחם שיף, תלמיד לתואר שני באוניברסיטת תל־אביב, עוקבת אחר רצף של ממצאים באתר העיר עבדת, והפרשנות אשר ניתנה להם החל בשנות החמישים וכלה בשנות התשעים.

שיף מראה כיצד התפתחה אצל נגב תמונה אידיאלית של תושבי הנגב הנבטים כדגם קדום של עם עצמאי, המפריח את השממה בעזרת תעוזה וחדשנות טכנולוגית. תמונה זו קיבלה נפח עקב פעילות מחזורית של חפירה, פרסומים בעיתונות ומיתוג האתר עבדת כסמל להתחדשות ישראלית־ציונית. ברבות הימים התברר כי הרבה ממה שיוחס לנבטים מקורו בטעות, וכי הפריחה הגדולה של היישוב בעבדת, ובמיוחד הפעילות החקלאית הענפה אשר

>>

>> הדבירה את השממה, הייתה מאוחרת בהרבה: כנראה התקופה הרומית המאוחרת, הביזנטית, ואולי אף התקופה האיסלאמית הקדומה. אולם הציפיות לקיומו של שבט נבטי עצמאי, שאפשר לראות בו דגם קדום של כיבוש השממה בידי הציונות, היו כה עזות, עד שאפילו גילוי של תנור לאפיית לחם פורש ככבשן לצריפת כלי החרס המיוחדים של הנבטים, ושרידי קירות בודדים – כעדות למקדש מלך. רק לאחר הסתלקותו של נגב מן הזירה החלו להיכתב מחקרים חדשים על עבדת, אשר הפריכו את מרבית ממצאיו. אולם גם בין עבודות אלה, כפי שמראה שיף, אין הסכמה מלאה, ואף מקורות הפרשנות החדשים טעונים בירור, שכן אין ספק שאף אלה מושפעים מציפיות חדשות.

ממצאים פרי התשוקה אינם נחלת העבר האידיאולוגי של הארכיאולוגיה הישראלית, והם עדיין מתגלים. הידועים יותר הם ממצאים בעלי זיקה להתמודדות הנמשכת של ישראלים עם זהותם: לפני כשנה, סמוך ליום ט׳ באב, דווח בהרחבה בעיתונות על גילויו של פעמון זהב סמוך לכותל המערבי של הר הבית. פעמון זה זכה מיד לכינוי "פעמון הכהן הגדול", וסיפור גילויו תועד בסרטון יחסי ציבור של החופרים – זאת, על אף שמדובר בחפץ שהתגלגל לתוך תעלת ניקוז וכלל אין לדעת את מקורו. באתר חורבת קייפא שבעמק האלה התגלתה לפני מספר שנים כתובת הכתובה בדיו על גבי שבר כלי חרס. על אף שאין פענוח ודאי של הכתובת (פורסמו לפחות חמש קריאות שונות בתכלית זו מזו), הדבר לא מנע מבעל התגלית לקבוע, כי היא מאמתת את קיומה של "ממלכת דוד" בירושלים. השנה שמענו על חותם זעיר מבית־שמש, אשר מייד עם גילויו הפך לעדות הקדומה ביותר לאגדות על שמשון.

אפשר להבין ללבו של דורון רוזנבלום, אשר קבל בטורו בעיתון "הארץ", כי "יש נחת מסוימת בעצם קיומה של אותה סינכרוניזציה מופלאה [...] היודעת להפיק בעבורנו תגלית לכל מועד וממצא לכל חג". אלא שהוא מבקש להבין: "מה מקבלים בארצות אחרות לחג? ומה נקבל בחנוכה הבא, כשירווח: שרוך מסנדלו של יהודה המכבי? חלקים מפך השמן? ובפסח – אולי את שרידי מטהו של משה?"

אוכל להרגיע את רוזנבלום: גם בארצות אחרות חפצים עתיקים ממקדים תשוקות לעבר אידיאלי. גם שם משמשת הארכיאולוגיה לריפוי טראומות של שכחה קולקטיבית (במיוחד במדינות לאום חדשות, כמו אלה שבמרחב הפוסט־סובייטי) או כהוכחה לתפיסת עולם. מי שיעקוב אחר המחקר על אי הפסחא שבאוקיינוס השקט, למשל, יוכל להבחין כיצד התקינות הפוליטית באה לידי ביטוי בממצאים ובפרשנות על עלייתה ונפילתה של תרבות הרפה־נוי, על פסלי המואי הענקיים שלה. פרשנות שהציגה את תושבי האי כאב־טיפוס של חברה המביאה על עצמה אבדון עקב הפקרות סביבתית, מוקעת היום כנגועה בחשיבה קולוניאליסטית. ממצאים חדשים מראים, כי ירידתה של התרבות הילידית היא תוצאה ישירה של מגע עם אירופים החל במאה השמונה־עשרה. אין סיבה לחשוב שזוהי המילה האחרונה בנושא זה.

האם קיים אוסף עדויות אובייקטיבי?

מתחת למעטה הסאטירי מסתתרת אפוא שאלה אמיתית: האם ארכיאולוגים תמיד מוצאים את מה שהם רוצים למצוא? ובמילים אחרות: האם בכלל קיים רקורד (אוסף של עדויות חומריות) ארכיאולוגי אובייקטיבי?

אפשר ששאלה זו תישמע מופרכת מיסודה: מדובר הרי בעובדות, וככל שהדברים אמורים בעבודה מדעית, הרי שזו מתקיימת במנותק מהתשוקות. העדות הארכיאולוגית, כל עוד היא אינה מזויפת, מבטאת ממשות קדומה החייבת לדבר בעד עצמה. מחשבה נוספת עלולה לטעת זרעי ספק: אפשר שהעניין אינו פשוט כלל, ולו רק מפאת העובדה ששניים החופרים באותו מקום ממש – ממצאיהם כמעט תמיד שונים זה מזה. הממצאים ממש, ולא רק פרשנותם. הכיצד?

הסברה שקיים רקורד ארכיאולוגי אובייקטיבי קשורה לנטייה לראות בארכיאולוגיה מתודה בלבד, ובארכיאולוגים עצמם – מעין טכנאי חפירה שאומנותם היא הוצאה מבוקרת של עתיקות מן האדמה. זוהי תמונה מרדדת המבקשת להפוך את הארכיאולוגיה לאוסף של פעולות מכניות, וזאת כדי לבטל את תוכנה האינטלקטואלי במקרה הטוב, ולהכפיף אותה לכללי התמחור, התחרות והייעול העסקי, במקרה הפחות טוב. האמירה שהעתיקות מחכות באדמה לחשיפתן דומה לאמירה שהפֶּסל מחכה בתוך האבן, ושהפַּסל הוא טכנאי המוציא לפועל את תבונת האבן.

כבר הסברנו לעיל שארכיאולוגים מייצרים זיכרונות. בבואם אל שרידי העבר, הם בוחרים את אלה שהם בעלי משמעות, או שאפשר להרכיב מהם משמעות על־ידי איסופם מחדש (re-collection). זהו תהליך של בחירה ומיון, שבו בוחרים במורשת – כלומר, מחליטים מה בעבר ראוי לשימור, לזכירה, להורשה לדורות הבאים, ומה אין לשמור, לזכור או להוריש. פעולות האיסוף, שימור הזכר וההורשה הן פעולות כנגד השכחה; ריפוי של פגעי הזמן. בכל הפעולות הללו מפעילים הארכיאולוגים שיקול דעת, הנובע מתפיסה לגבי מה שחשוב וראוי לזכירה ולשמירה. זוהי אומנותם. בבוחרם לעצב את המורשת (כלומר, מה שראוי להוריש), הם משליכים מרצונותיהם, דימוייהם, תפיסות העולם שלהם – אל ההווה ואל העתיד. חקר העבר אפוא הוא מעשה תרבותי בהווה, המכוון אל העתיד.

מתוך כך מובן כי אותו גוף של עדות המכונה "הרקורד הארכיאולוגי", אינו דבר סביל ומוגדר המחכה להיחשף, אלא מכלול המיוצר, ממש כך, על־ידי החוקר או החוקרת ממרכיבים הנתונים

בתחום מחקרם. כדי להבין טפח ממה שכרוך בייצור זה, נדמיין שתי משלחות העומדות לחפור, זו לצד זו, באתר אחד. בשלב זה נתאר אותן על־פי מאפיינים חיצוניים, אולם בהמשך נעמיק את מחקרנו וננסה להבין את ההקשרים הרחבים יותר של פעולותיהן ואת מטענן הערכי.

משלחת א׳ מתכננת חפירה נרחבת, על מנת לחשוף מכלולי בנייה רחבים, מבני ציבור או תכנית עיר. היא מצטיידת בכלי עבודה רבים, בצוות רחב של עוזרים ובמספר גדול של חופרים, וכדי להתקדם במהירות מספקת, היא חופרת בעיקר במכושים ובטוריות. קצב החפירה מווסת לפי הממצאים: כאשר יש ריכוז גדול העבודה איטית יותר, וכאשר אין – העבודה מהירה יותר. למשלחת א׳ יש תשתית המתאימה לגודלה ולמטרותיה: מחסנים לכלי העבודה ולממצאים, מכשירי מדידה רבים כדי לתעד את הממצאים, אמצעי הגבהה לצילום שטחים רחבים וכיו״ב.

משלחת ב׳ מתכננת חפירה אינטנסיבית, על שטח קטן, על מנת לעקוב אחר מכלול פעולות מצומצמות בהיקפן – עיבוד והכנת מזון מן הצומח והחי, השלכת פסולת או תנועה בתוך בית מגורים. היא מצטיידת בכלי עבודה עדינים, במכשירים מדויקים, בצוות של אנשי מדע מתחומים מגוונים ובמספר קטן של חופרים מיומנים. כדי לעקוב אחר היקף הדגימה, כל השטח נחפר בקצב אחיד, וכל העפר מנופה על־פי פרוטוקול קבוע מראש. גם למשלחת ב׳ יש תשתית המתאימה למטרותיה: מכשור מתוחכם, מעבדות מחקר וכיו״ב.

מייד יובן כי שתי המשלחות מייצרות עדות ארכיאולוגית שונה בתכלית. האחת מורכבת מבתים שלמים ותכולתם הנראית לעין, מרחובות ואולי אף ממבני ציבור, והאחרת – מהפרטים הקטנים שמהם עשויים חיי היומיום, בין אם נראים ובין אם בלתי נראים. כל עדות כזו תספק תשובות למערכת שונה של שאלות אשר נשאלו מלכתחילה, ותיצור שני סיפורים שונים בתכלית, אף כי לא בהכרח סותרים.

אם השאלות הן אלה המכוונות את הסיפור, עלינו לברר מי מחליט על השאלות כשלעצמן; מהי הסביבה הארגונית, האינטלקטואלית ואף החברתית של שואלי השאלות במשלחת א׳ ובמשלחת ב׳; בפני מי הן צריכות להתייצב וליתן דין וחשבון. אפשר שמשלחת א׳ ממומנת על־ידי קהילת חופריה ושוחריה בציבור הרחב או על־ידי רשות ציבורית, והיא צריכה לתחזק את מעמדה על־ידי נוכחות מתמדת במדיה הציבורית. אפשר שמשלחת ב׳ ממומנת על־ידי קרנות מחקר, והיא תלויה בנוכחות מתמדת במדיה האקדמית. תלות זו בקבוצות התייחסות שונות אחראית להיווצרותה של מערכת ערכית שונה עבור כל משלחת (משלחת אחרת עשויה להיות תלויה ביזם, נדבן, חוזה ממשלתי וכו׳). ועדיין לא דיברנו על הנסיבות האישיות של מנהלי המשלחת – מבחינה מקצועית, דורית, מגדרית וכו׳.

מתברר אפוא שהעדות הארכיאולוגית היא פרי של אינטרקציה



ליו דינג, ״גיבור״, 2007

Liu Ding, "Hero" 2007, 3/8, white marble, black marble (sculpture on base) 210 cm, 30 cm, Courtesy: the artist and Galerie Urs Meile, Beijing–Lucerne

מרובת מרכיבים, הכוללת אנשים, ארגונים ואף חפצים (כגון כלי עבודה, מכשור מעבדתי ומקומות אחסון, שלא לדבר על הממצא החומרי עצמו), וכי כל ניסיון להעריך את ״האמת הארכיאולוגית״ חייב להביא מערכת זו של סוכנים ורשתות – actors and networks, כלשונו של ברונו לטור – בחשבון.

קיומם של סוכנים ורשתות עדיין אינו מבטל את ממשותם של הממצאים. אלה – בין אם נאספו ביד רחבה ובין אם ביד קמוצה; בין אם נופו ברשת של עשרה מילימטר ובין אם ברשת של מיקרון אחד – קיימים ותובעים הכרה. הם מגבילים ומרסנים את טווח הסיפורים האפשריים על העבר. כללי הדיווח הארכיאולוגי אינם מרשים זיוף ממצאים או העלמתם.

לכן, בסיכומו של דבר, אפשר לקבוע בפרפראזה על קרל מרקס, כי ארכיאולוגים אמנם מעצבים את העדות הארכיאולוגית, אך לא כפי רצונם, אלא בהתאם לתנאים הנקבעים על־ידי ממשות >>

<< השרידים, על־ידי סביבתם הארגונית והחברתית ועל־ידי הכרעתם הערכית. כדי להבין כראוי את היחס בין הממצא לפרשנותו, עלינו להיות מסוגלים לפענח את מרכיבי הרשת המייצרת את המידע הארכיאולוגי. בצמתים רבים של רשת זו, ובמיוחד בפעולתו של החוקר האחראי באופן מיידי על ייצור העדות, מופעלים שיקולים ערכיים על מנת להכריע מהם סדרי העדיפויות בשמירה על מורשת העבר. מכלול השיקולים הערכיים הללו מעניק ממד מוסרי ופוליטי לעבודת הזיכרון הארכיאולוגית.

ארכיאולוגיה בעולם פוסט־מודרני

טלן הדמיונית, מסכם בורחס ב"אחרית דבר", כבר פלשה לעולמנו: **"הוראת ההיסטוריה ההרמונית (ורצופת הפרשות המרגשות) כבר ביטלה את ההיסטוריה שלימדו אותי בילדותי; בזיכרונות כבר תופס עבר בדוי את מקומו של העבר האחר, שעליו אין אנו יודעים דבר לבטח".**

אכן, מניפולציות של העבר אינן נחלתם של משטרים אפלים בלבד, כפי שלמדנו לאורך המאה העשרים, אלא הן פרי היחס הציני אל עצם רעיון ה"אמת", המצוי ביסוד היחסים ההדדיים בינינו לבין עולמות התקשורת, הפוליטיקה והשוק החופשי. מלאכת המצאת העבר הפכה קלה יותר מאי־פעם, וכיום מופצות גירסאות מתוקנות ומרוטשות של המציאות ביעילות ויראלית ברחבי רשתות המידע. אמני הספין הפכו לבעלי מקצוע מבוקשים, והתופעה הזו לא איחרה לחדור לעולם הארכיאולוגי. האינטרנט והרשתות החברתיות מפיצים דימויים חלופיים ואף מתחרים של העבר באלפי אתרים ובלוגים, בעוד שארכיאולוגים "מתקדמים" (ואני בתוכם) מצטנעים ומציגים את עצמם כמספרי סיפורים בלבד.

אין פתרון פלא למצב עניינים זה. אפשר להכביר בנתונים חדשים ולהתבצר במגדלי שן של טכנולוגיית עילית או של שפת סתרים אקדמית, אך בחשבון אחרון, תוספת של תצפיות ו"עובדות" לבדה לא תועיל, משום שראשיתה של הפעולה – השאלות הנשאלות, וסופה – הפרשנות הניתנת לעדויות, כפופים להכרעות ערכיות. לא נוכל לקבל גירסה של העבר המיוסדת על אדנים הנראים לנו כבלתי אנושיים, או כאלה המיועדים לבנות עתיד של חוסר צדק או סבל אנושי. וכשם שלא נקבל היסטוריה המנקה אשמים, או תיאוריה חברתית שנועדה לשעבד ולהפלות, כך לא נקבל ארכיאולוגיה שנועדה לבסס או להצדיק גזענות או לאומנות (אף שנקבל עדויות ארכיאולוגיות לקיומן של תיאוריות גזע בעבר). תחת זאת נעדיף ארכיאולוגיה הנותנת קול לחלשים, למדוכאים, ולאלה שההיסטוריה הכתובה השאירה מאחור. זו עשויה להיות אחריותנו כעדים ומורשתנו לדורות הבאים.



ליו דינג, "להיות דרמטי במדינה טהורה", 2009
Liu Ding, "Being Dramatic in a Pure State" 2009, Qing–Dynasty (16441911–) vase replica, mirror, correction fluid, shipping crate, unicum, 61 x ø 25 cm (vase), 150 x 100 x 0.5 cm (mirror), 96 x 50 x 50 cm (crate), Private Collection, Switzerland, Courtesy: Galerie Urs Meile, Beijing–Lucerne

ליו דינג קורא תיגר באופן עקבי על ההקשר הקונבנציונלי שבו מופיעים שמות ומושגים כמו מעמד האמן, יצירת אמנות, האנשים המעורבים בהפקה של יצירת האמנות, גלריות ומוזיאונים, אספנים, קהל וכיו"ב. לפיכך, עבודות האמנות שלו, כמו גם הכתיבה על אמנות, הן לרוב תיאורטיות ומבטאות חשיבה ביקורתית. בפרויקט האמנות המושגית המתמשך שלו, "המחסן של ליו דינג", שהחל ב-2008, הוא מציג ודן במנגנונים שונים, גלויים ונסתרים, בשיטה האמנותית שייעודם הוא יצירת ערך. כמו־כן האמן משתמש בעבודותיו בחפצים בעלי משמעות סמלית והיסטורית (אגרטלים, דיוקן ראש מפוסל, סלעים, תמונות, ספרים) אותם הוא מטעין בהקשרים תרבותיים מגוונים באמצעות כיתוב טקסט על גבי אובייקט בדרך לבקר את המנגנון בו מתקיימת יצירת האמנות.

נעם מנלה

כבר לא עוטפים דגים עם השם שלך...

אותנטיות היא תכונה נחשקת שאיש אינו יודע להגדירה במדויק, אבל ברור שהיא מצרך נדיר מאוד בעידן השיווק העצמי הכוזב. נעם מנלה מנסה לסמן מה מבדיל בין אדם אותנטי לאדם מודרני

ב־1913 מפרסם הרפתקן אירי בשם ארנסט שקלטון מודעת "דרושים" קטנה בעיתון. נוסח המודעה מוזר למדי: **דרושים גברים למסע מסוכן. שכר מזערי, קור מקפיא, חודשים ארוכים של חשכה מוחלטת, סכנה מתמדת. חזרה בשלום מוטלת בספק, כבוד והוקרה במקרה של הצלחה. ארנסט שקלטון**

מדוע טורח מזמין המודעה להכביר במידע מרתיע במקום לדבר רק על האפשרות לתהילה? מדוע הוא מדבר על קשיים ולא על אתגרים, כמקובל בימינו? האם הוא לא קרא את ספרי השיווק, הפרסום והתעמולה הבסיסיים, שמלמדים כי עדיף להראות את הצד הזוהר של החיים?

טים סאנדרס, מחבר הספר "The Likeability Factor", מציין ארבע תכונות אנושיות מרכזיות, הגורמות לנו להימשך אל אנשים אחרים ולנהות אחריהם: לבביות, שייכות (תפיסת עולם או עניין משותפים), אמפתיה ו... אותנטיות. על־פי סאנדרס, אנשים אותנטיים מעוררים בנו אמון, גם אם אנחנו לא מסכימים עם דעתם. כאשר אתה עומד לצאת בשנת 1913 לקוטב הדרומי עם אדם לא מוכר, אתה קודם־כול מחפש ביטחון. אתה מחפש מישהו שתוכל לסמוך עליו, מישהו שהיית קונה ממנו סוס פוני יד שנייה. סיפור מסעם המופלא וחזרתם בחיים של שקלטון וצוותו הוכיח, שכל מילה במודעה הזאת הייתה אמת לאמיתה; ויקיפדיה תשמח להרחיב בנושא. בסרט שעשה ה־BBC בשנות החמישים, אמר אחד מחברי המשלחת: "עד היום חייב לי סר שקלטון 20 פאונד שהלוויתי לו. אין סיכוי שאלווה לו פני נוסף אי־פעם, אבל אם הוא היה קורא לי לצאת איתו למסע נוסף בקוטב, הייתי מצטרף ללא היסוס". שקלטון בחר בָאמת כמכשיר מנהיגותי. ד"ר גלית עילם־שמיר קוראת לזה מנהיגות אותנטית ומוסיפה, ש"מנהיגים אותנטיים הם יצירות מקור ולא חיקויים".

http://en.wikipedia.org/wiki/Ernest_Shackleton

הבטן הרכה של האותנטיות היא, שלא ניתן להגדיר אותה במילים; היא יותר תחושה מאשר עובדה. עם זאת, בהירותה האינטואיטיבית ניכרת. חוקרים רבים ניסו להתמודד עם הקושי (האתגר?) להגדירה. רוב ההגדרות מציינות את הנאמנות של אדם לאמונותיו, ערכיו, מחשבותיו, רגשותיו, וכמובן הקשר הישיר בין מה שחושבים למה שאומרים כמאפייני האותנטיות. ניטשה, למשל, דיבר על כך שבכל אחד מאיתנו קיים מארג של אופי, תפיסות וערכים ייחודי, ואותנטיות היא היכולת לתת ביטוי למארג זה. רוב ההגדרות עוצרות פה. לטעמי, הן חסרות את המרכיב הבסיסי ביותר של אותנטיות: **"מחיר ההוכחה"**. האדם האותנטי חייב להיות נכון לשלם מחיר עבור תפיסת עולמו. **"מחיר ההוכחה"** הוא זה שהופך את האותנטיות לתכונה נעלה, מבוקשת ונדירה, מאחר שמעט מוכנים לשלמו. זה לא אומר שהאדם האותנטי תמיד ייאלץ לשלם את המחיר, אבל הוא חייב להיות נכון לשלמו בכל רגע נתון. **"מחיר ההוכחה"** הוא בעצם אבולוציה של "עקרון ההכבדה" הזואולוגי של פרופ' אמוץ זהבי. "עקרון ההכבדה" קובע, שכדי לשדר אמינות בעולם החי עליך לשלם מחיר. לשם המחשה אתם

<<


qualified. M. L. Barker. 1408 Chapman Bldg.

MEN WANTED for hazardous journey, small wages, bitter cold, long months of complete darkness, constant danger, safe return doubtful, honor and recognition in case of success.
Ernest Shackleton 4 Burlington st.

MEN—Neat-appearing young men of pleasing personality, between ages 21 and 40 to work

מודעת "דרושים" שפרסם ארנסט שקלטון



בול שהנפיקה ממשלת אוסטרליה להנצחת מסעו של ארנסט שקלטון לקוטב הדרומי / דימוי: ויקישיתוף



אפליקציה של חברת AT&T לפתרון בעיות ותקלות של החברה

<< מוזמנים לצאת איתי רגע למסע קצר בסוואנה. נמר רעב מתקדם לעבר עדר של אנטילופות. הוא מתקרב, בוחן את העדר בקפידה ומתלבט, איזו אנטילופה תהיה הסעודה הבאה שלו. בנקודת זמן מכרעת זו (רגע בחירת הטרף) נפגשים האינטרסים של הנמר ושל אנטילופה צעירה, חזקה ומהירה שנמצאת בעדר. שניהם רוצים להימנע מאותו הדבר ממש: מאמץ חינם. הוא לא רוצה לרדוף לחינם, והיא לא רוצה לברוח לחינם. כי בטבע אין ארוחות חינם; על רדיפה/בריחה משלמים בהרבה מאוד אנרגיה. כל שעל האנטילופה לעשות הוא להגיד לנמר, עזוב אותי, אני מהירה מדי בשבילך. איך החזק (או המהיר, במקרה שלנו) משכנע שהוא אכן כזה? על השאלה המהותית הזו האבולוציה נתנה מענה חד וחלק – אם אתה באמת כזה, תוכיח את זה. ברגע שהאנטילופה מבחינה בנמר, במקום להתרחק ולנוס על נפשה, בדומה למרבית חבריה לעדר, היא בוחרת להישאר קרוב אליו ולנתר במקום לגובה (Stoting).. הקרבה היתרה לנמר היא "מחיר ההוכחה" שמשלמת האנטילופה עבור אמינותה. מתברר שברוב המקרים יעדיף הנמר לרוץ אחרי האנטילופות המתרחקות. שקלטון, בדומה לאנטילופה, מוכן גם הוא לשלם את מחיר האמת. שהרי בחשיפת הקשיים האיומים במודעה הוא מרתיע חברי משלחת פוטנציאליים... ובכך, בעצם, מסכן את מעט כספו במודעה לא יעילה.

החברה מצמידה לכל התנהגות תג מחיר. במהלך חיינו אנחנו לומדים לדעת, על מה נקבל מהחברה מסביבנו פרס ועל מה קנס. אנחנו לומדים אילו רגשות כדאי להחצין בפרהסיה, ואילו כדאי להצניע כי המחיר עלול להיות יקר. עמוס עוז מנסח את זה בתמציתיות בספרו האחרון "בין חברים", שעלילתו מתרחשת בקיבוץ יקהת: "המחנך אמר: ...ותפסיק להסתפר כל־כך קצר... אתה נראה כמו פליט... הגיע הזמן שתהיה לך בלורית כמו לכל הבנים". המחנך מלמד את הנער הצעיר להיפרד מייחודו ולזייף.

רשת פייסבוק מהווה מראה חברתית ענקית לרמת האותנטיות שלנו. חייזר שיגיע לעולמנו וייכנס לפייסבוק, יהיה בטוח שמדובר בכוכב הלכת המאושר ביותר ביקום. הוא יראה תמונות פסטורליות של ילדים נפלאים וחייכניים וזוגיות מאושרת (גם הן סוג של בלורית). לפי פייסבוק, האושר הוא קולקטיבי והעצב פרטי. זה לא מקרי. מחקרים מוכיחים כי החברה המערבית מתגמלת על אושר, גם אם מזויף – מלצרים מחייכים יקבלו הרבה יותר טיפים ממלצרים קורקטיים.

מרקוזה את קרל מרקס ואסכולת פרנקפורט טבעו בשנות העשרים

של המאה הקודמת את המושג "תודעה כוזבת". הרעיון בעיקרו הוא, שאנשים מנהלים את חייהם בהתאם לתפיסות מקובלות, המעצבות את סגנון החיים, את השאיפות ואת התודעה שלהם. האדם העדרי, השואף להיות אי־שם בחיקו הנעים והבטוח של העדר, יאמץ תודעה שאינה שלו. בעולם כזה, המחיר שאנו נדרשים לשלם עבור מי שאנו, הוא מעבר ליכולתם של רוב האנשים. מי ששולט באמצעי התודעה המרכזיים (ארגונים, תקשורת) מכתיב את נורמת ה"כזב" על־פיה נחיה.

ארגונים הם אחד המקומות בהם מעוצבת התודעה הכוזבת שלנו בעוצמה אדירה. העובדים נתונים לאינדוקטרינציה יומיומית המגיעה מלמעלה, ומי שיוצא כנגדה מסתכן בפיטורים ובאובדן הכנסתו. כך פועלת השרשרת: המנכ"ל מכנס את עובדי הארגון ומכריז בחגיגיות, "אנחנו משפחה" (ולמחרת מפטר חלק מהמשפחה שלו). מכאן משתרשר הכזב במהירות למענה הטלפוני, שחוזר בלי סוף ובלי לאות באוזני הלקוחות הממתינים עד בוש על הקו, על המשפט "שיחתך חשובה לנו". ומכאן כבר הדרך לערבול וערפול המחיר אותו נשלם עבור השיחות והגלישה שלנו בנייד, קצרה. אנשי הארגון כבר אינם מרגישים כיצד הכזב התודעתי פשה בהם. הם עברו בנאליזציה של הכזב.

אפילוג אופטימי

בעצם הימים הללו אנו עדים להיחלשותו של העולם הכוזב במתכונתו הישנה. חוק אקסלרוד, שד"ר אשר עידן הזכיר אותו בגיליון "אודיסאה" האחרון, קובע, שככל שמספר האיטרציות (חזרות על פעולה כלשהי, המאפשרות להפיק לקחים) בין בני האדם גדול יותר, כך עולה רמת האמון ביניהם. נראה שזה בדיוק מה שקורה לנו בעת הזאת. כיכר העיר (הרשתות החברתיות) עברה לידי ההמון, בעיקר ההמון הצעיר הנקרא דור ה־Y. זה החליט – בחוכמתו ההמונית – להעלות על המוקד בכיכר את אנשי התודעה הכוזבת הישנה – דיקטטורים, חברות תקשורת וכו'. יתרה מכך, לכיכר העיר יש, בזכות גוגל, זיכרון נצחי. אי־אפשר לעטוף דגים עם הזיכרון הרשתי. הזייפנים מתחילים להיבהל. זה לא נעים להיות מוקע בכיכר העיר, וזה לא נעים שבכל פעם שיגגלו את השם שלך, יקפוץ יחד איתו הזיוף שלך. אצלי, למשל, כתוב "ד"ר נעם מנלה" בגוגל, ואני בכלל לא דוקטור... עכשיו תארו לכם שהיה שם משהו שלילי.

התוצאה היא ששיווי המשקל בין האמת לשקר משתנה. מחירו של הזיוף מאמיר, והוא הופך יקר יותר ממחיר האותנטיות. מתקיים היפוך ערכי וכלכלי. הכלכלה האותנטית מתחילה לשאת פירות. אדל האותנטית כובשת את העולם על חשבון ליידי גאגא המלאכותית והשיווקית. חברה שנואה כמו AT&T מציעה אפליקציה שכל־כולה ביקורת על עצמה (ראה תמונה בעמ' 24). חמישה מיליון אמריקאים מורידים את האפליקציה ולא חוסכים את שבטם מהמותג. הזובור ל־AT&T מתקיים בכיכר העיר ובחסות AT&T. החברה משלמת את מחיר הוכחת הכנות שלה ורצונה להשתפר. מנגד, חברת תה אזוטרית בשם Honest Tea, שחרתה על דגלה כנות ושקיפות, נמכרת לקוקה־קולה ב־140 מיליון דולר.

מבחן העיר ההגונה ביותר באמריקה של "תה הגון" ביוטיוב:
Honest Tea: The Most Honest City In America

האם מדובר בעוד טרנד חולף? ימים יגידו. אבל נראה שבשנים הקרובות בני אדם צפויים לשלם מחיר גבוה יותר על זיוף מאשר על אותנטיות, ולכן בבורסת הערכים מעריכים ש"מחיר ההוכחה" צפוי לרדת...

נעם מנלה הוא יועץ העוסק בשינוי "תודעה ארגונית", מחבר הספר "הקוד היצירתי" ובעל בלוג על אותנטיות:
http://www.fakeyou.co.il
www.manella.co.il/theBook.asp

* הרחבת עיקרון ההכבדה נעשתה בשיתוף ד"ר אורי אורן

"האדם האותנטי חייב להיות נכון לשלם מחיר עבור תפיסת עולמו. 'מחיר ההוכחה' הוא זה שהופך את האותנטיות לתכונה נעלה, מבוקשת ונדירה, מאחר שמעט מוכנים לשלמו. זה לא אומר שהאדם האותנטי תמיד ייאלץ לשלם את המחיר, אבל הוא חייב להיות נכון לשלמו בכל רגע נתון"



עילם גרוס חוגג, יחד עם קבוצת החיפוש אחר ההיגס של אטלס, את גילוי החלקיק

פיזיקה

עילם גרוס

026

מצאנו!

בדיוק לפני ארבע שנים, באוקטובר 2008, פרסם פרופ' עילם גרוס בגיליון מס' 1 של "אודיסאה" את מאמרו "החיפוש אחר החלקיק האלוהי". לרגל מציאת חלקיק היגס אנחנו מפרסמים פעם נוספת את עיקרי המאמר, המהווה את אחד ההסברים הבהירים להבנת חשיבות החלקיק לפיזיקה המודרנית. למאמר מצורף (בתחילתו) "סוף דבר" עדכני שכתב פרופ' גרוס החודש, בתום 25 שנים שבמהלכן היה שותף מרכזי להליך הגילוי ההיסטורי

ביולי 2011 מצאתי את עצמי באיטליה, עוסק בחיפוש אחר חומר אפל. זו הייתה נקודת שבירה. אחרי עשר שנים של דילוג בין מכון ויצמן ברחובות לסרן (CERN) שבשווייץ, שנים שבהן עסקתי באובססיביות בנושא מרכזי אחד, ושבמהלכן התמודדתי שנה אחרי שנה על אחד התפקידים המרכזיים בגלאי אטלס – "מרכֵּז חיפושי חלקיק ההיגס בניסוי אטלס בסרן" (Higgs Convener) – החלטתי שכנראה לא אזכה בתפקיד הנחשק, ואולי גם לא אראה את "הארץ המובטחת".

בתחושה של השלמה התחלתי לחלק את זמני בין החיפוש אחר ההיגס בסרן לחיפוש אחרי סימני חומר אפל באיטליה. ואז, ממש רגע לפני שהחלטתי להפסיק לשאוף לתפקיד הנחשק ולהעלות מהלך בעבודתי באיטליה, הגיעה שיחת הטלפון הנחשקת מסרן, שיחה שבה הוצע לי רשמית להוביל את חיפוש ההיגס באטלס יחד עם סנדרה קורטנר. מובן שקיבלתי את ההצעה. נכנסתי לתפקיד, בעוד חברי הטוב אלכס ריד מחליף אותי כאחראי על ניתוח הנתונים הסטטיסטיים של אטלס. ההיגס, מיותר לומר, לא נראה באופק, וממש לא היה ברור מה יקרה בשנתיים בהן אכהן בתפקיד. לפני כשנה, באוקטובר 2011, הוזמנתי לכנס שנקרא "Higgs Hunting" בפריז. כמעט כל מי שהתעסק בחיפוש אחרי החלקיק היה שם, ביניהם, כמובן, אלכס ריד ומרומי קאדו. מרומי החליף לאחרונה את סנדרה ומוביל את קבוצת ההיגס יחד איתי בשנה הקרובה. הוא אירח אותנו בדירתו המדהימה, הממוקמת בקומה גבוהה ברובע סן ז'רמן בפריז. בשלב מסוים, אחרי ארוחת ערב מופלאה שלוותה בבקבוקי יין צרפתי משובח, מרומי הציע לי כוסית של גרפה. "אתה חייב", הוא אמר. "Prime Uve – הכי טוב שיש".

זו, כמובן, הייתה טעות, ותוך דקות ספורות שקעתי בתרדמת שיכורים. כמה שעות אחרי כן, אני זוכר שזה היה ממש לפנות בוקר, הרגשתי שמרומי ואלכס מנערים אותי בתקיפות ומעירים אותי משינה עמוקה. לא הבנתי מה הם רוצים, אבל הצלחתי לשמוע את מרומי אומר משפט לא ברור: "עילם, אתה רוצה לראות את ההיגס?" התעוררתי מיד וקפצתי מהמיטה. "איפה? מה? על מה אתה מדבר?" שאלתי.

"המחשב גמר לרוץ, והנה התוצאה מופיעה", הוא אמר. על מסך המחשב שלו הופיעה התמונה שנשלחה אלינו מסרן (איור 1). שלושתנו עמדנו מוכי הלם. יש משהו חריג במסה של 126 GeV (יחידת מסה ששקולה בקירוב למסת הפרוטון) שהופיעה על המסך עם 3.6 סטיות תקן. לא האמנו – בהינו במסך שעה ארוכה עד שהתחלנו לעכל. במשך שלושה שבועות ארוכים שנמשכו מאותו רגע עסקנו כולנו, כל קבוצת ההיגס באטלס, בניסיון לבדוק ולבחון את התוצאה מכל כיוון אפשרי. אולי טעינו... אולי יש באג בתוכנה.

ה־4 ביולי הוא יום העצמאות של ארה"ב. אנחנו, חברי קבוצת ההיגס באטלס, קוראים ליום הזה Higgs Hunters' Independence Day. ב־4 ביולי 2012 הכריזו בסרן באופן רשמי על גילוי ההיגס. אנחנו, שעד לאותו יום צדנו את ההיגס, לא נהיה יותר "ציידי היגס". מאותו תאריך ואילך אנחנו אנלייזרים של היגס. מודדים את תכונותיו ומאשרים את התגלית מכל כיוון אפשרי.

בשנים 2011 ו־2012 חולל מאיץ החלקיקים LHC שבז'נבה מעל קוואדריליון (אלף טריליון, על־פי שיטת המספור האמריקאית) התנגשויות בין פרוטונים, באנרגיה עצומה (עד 8 ביליון אלקטרון־וולט) – כל זה, במטרה לייצר את חלקיק ההיגס. בכל התנגשות כזאת נוצרים חלקיקים רבים ושונים, ואין אפשרות לנבא מראש מה יקרה. תורת השדות הקוונטיים מאפשרת לחזות את הסיכוי להיווצרותו של חלקיק מסוים. החישוב מראה שהסיכוי לקבל בהתנגשות את חלקיק ההיגס הוא כה קטן, שלאורך כל השנה לא נוכל "לראות" (לגלות) יותר מכמה מאות אירועים כאלה.

הבעיה הגדולה הייתה שאיננו יודעים לזהות את החלקיק בוודאות. הוא נראה בדיוק כמו מאות או אלפי חלקיקים אחרים שנוצרים בהתנגשויות. באיור 3 אנחנו רואים תמונת תוצר של התנגשות, שייתכן כי הוא חלקיק ההיגס וייתכן שאלה חלקיקים אחרים, שנראים בדיוק כמוהו.

מה שמאפשר לנו להכריז על תגלית הוא, שאנחנו מכירים את "החלקיקים האחרים", אלה שדומים להיגס, ואנחנו יודעים כמה מהם אנחנו מצפים לראות כתוצאה ממספר התנגשויות נתון. אז אנחנו משווים את מספר החלקיקים שאנחנו רואים עם מספר החלקיקים הממוצע שאנחנו מצפים לראות. אם אנחנו רואים הרבה יותר חלקיקים ממה שאנחנו מצפים לראות, הסיכוי שאלה הם "חלקיקים אחרים ומוכרים" קטן מאוד. במקרה כזה אנחנו נכנסים לכוננות גילוי. אם במקום 10 חלקיקים שאנחנו מצפים לראות בממוצע נראה 12 חלקיקים שנראים כמו היגס, לא נתרגש. הסיכוי לכך הוא יותר מ־30% (בשפה הסטטיסטית, מדובר בפחות מסטיית תקן אחת). אבל אם במקום 1,000 נראה 1,200, זו כבר תוצאה לא ממש סבירה; הסיכוי לכך קטן מאחד למיליון ומדובר במעל 5 סטיות תקן. מקובל להכריז על גילוי כאשר התצפית חורגת מהצפי הממוצע במעל 5 סטיות תקן.

וכך קרה. ב־4 ביולי 2012 הכריזו שני מרכזי הניסיונות בסרן, אטלס ו־CMS, שכל אחד ראה באופן בלתי תלוי חלקיק חדש במסה של כ־126 GeV וברמת חריגה סטטיסטית מהממוצע של 5 סטיות תקן. נכון להיום, אטלס רואה את חלקיק ההיגס במובהקות סטטיסטית של 6 סטיות תקן (איור 2)

חלקיק ההיגס מתפרק מיד כשהוא נוצר, ואנחנו מזהים אותו דרך תוצרי ההתפרקות שלו. באיורים הבאים אנחנו רואים תצלומים של >>

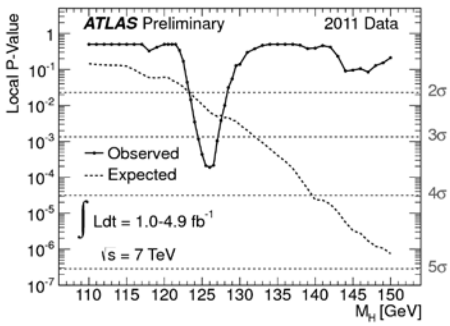
>> תוצרי התנגשויות שנראים כמו חלקיקי היגס. באיור 3 נראה היגס שמתפרק לשני פוטונים, ובאיור 4 נראה היגס שמתפרק לארבעה אלקטרונים. כפי שהסברתי במאמר מ־2008, המתפרסם בהמשך לפתיח זה, האיורים הללו הם למעשה תצלומים של תוצרי היגס.

קבוצת ההיגס של אטלס מורכבת משבע תת־קבוצות. ביום הגילוי אספנו את מאות חברי הקבוצה ופתחנו שבעה בקבוקי שמפניה לסמל את הגילוי (ראו צילום בעמ' 34). כשהרמנו את כוסות השמפניה לברך, לא יכולנו שלא להיזכר בגילוי האלקטרון ב־1897. מספרים ששאלו את מגלה האלקטרון, ג. ג. תומסון, למה מעניין לחפש חלקיק שאף אחד לא רואה, ותומסון, בתגובה, הרים כוסית שמפניה ובירך: To the useless electron . האם ההיגס חסר תועלת באותה מידה?

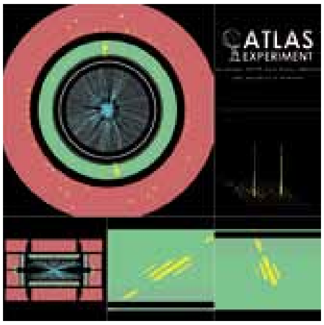
הגלאי הישראלי נבנה על ידי צוות מדענים מאוניברסיטת תל־אביב, הטכניון ומכון ויצמן בראשותו של פרופ' גיורא מיקנברג ממכון ויצמן. המימון חסר התקדים לפרויקט ניתן על־ידי ות"ת והקרן הישראלית למדע, האקדמיה הישראלית למדעים, הוועדה לאנרגיות גבוהות (בראשותו של הפרופ' אליעזר רבינוביץ) ומשרדי התעשייה והמדע

ב־4 ביולי 2012 סרן כתבה דף חשוב בספר הטבע שניוטון היטיב כל־כך לקרוא בו. אנחנו מבינים היום את מבנה החומר ברמה בסיסית ביותר. בעיני, חשיבותה של התגלית מתמצית, בראש ובראשונה, בעצם היותה הישג אינטלקטואלי עצום של המדע הבסיסי ושל המין האנושי. בשנות השישים ניבאו פיטר היגס, פרנסואה אנגלרט וחבריהם את קיום ההיגס וטענו, שזוהי האפשרות היחידה להקנות מסה לחלקיקים היסודיים, והנה היום, חמישים שנה אחרי, המין האנושי מתכנן מכונת ענק ומוכיח את נכונות התיאוריה.

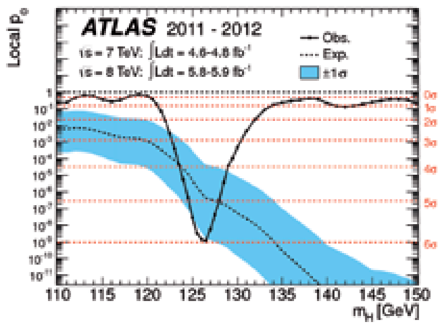
אני, אישית, הגשמתי חלום. אני נזכר היום במאמר שכתבתי ל"אודיסאה" לפני ארבע שנים בדיוק. הקדשתי מאמץ עצום לנסות ולהסביר מה כרוך בחיפוש, מה משמעות הגילוי, ואיך תיראה הפיזיקה במקרה שחלקיק היגס יתגלה (או לא). בסיום המאמר נתתי את מילתי האישית והבטחתי לקוראים – "ההיגס יתגלה". ההבטחה מומשה. התמזל מזלי להיות בתפקיד הנכון בזמן הנכון ולהגשים חלום של חיים. ביום הגילוי הסענו אלכס ואני את מרומי לשדה התעופה. הבטנו כולנו זה בזה ואמרנו ביחד: "בחיי שהעולם נראה פתאום בהיר יותר, ברור יותר". חשנו שאנחנו מבינים טוב יותר איך הטבע עובד, שמשהו בעולם השתנה. אמירתו של ויליאם בלייק, "אני רואה את העולם בגרגר חול", קיבלה משנה תוקף.



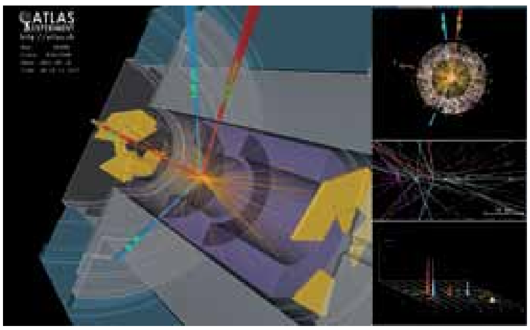
איור 1: אוקטובר 2011: הרמז הראשון לקיומו של ההיגס, כפי שהראו לי אלכס ומרומי. הסיכוי לכך שהמאורעות הנראים במסה של כ־126 פעם מסת הפרוטון הם תנודה סטטיסטית ולא היגס, הוא כ־1:10,000 (3.6 סטיות תקן).



איור 3: חלקיק דמוי היגס (או היגס) שמתפרק לשני פוטונים



איור 2: גילוי ההיגס באטלס. יולי 2012: ההיגס במסה של 126 פעם מסת הפרוטון (126 GeV) נראה במובהקות סטטיסטית של 6 סטיות תקן.



איור 4: היגס או חלקיק דמוי היגס מתפרק לארבעה אלקטרונים

עילם גרוס

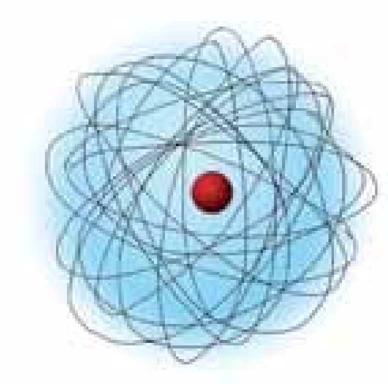
החיפוש אחר החלקיק האלוהי (פורסם ב־2008)

הניסיון המופלא שמתרחש בסרן שבשווייץ, אמור לקרב את האנושות יותר מכול אל רגע הבריאה – הזמן שבו התרחש המפץ הגדול ונוצרו חלקיקי היסוד שמרכיבים את היקום שלנו. מיליארדי דולרים מושקעים במסע האדם להכרת עצמו, בניסיון להבין מאין באנו ולאן אנחנו הולכים. פרופ' עילם גרוס, הנמנה עם המדענים הישראלים הפועלים בניסוי, מלהטט בשתי ידיו (ובלשונו) עם פרוטונים, אלקטרונים ופוטונים הנעים בחלל, כדי להסביר למה חשוב לפגוש את חלקיק ההיגס

<<

>> לפני כ־14 מיליארד שנה, 13.7 אם רוצים לדייק, נולד היקום. הוא נולד מנקודה ייחודית עתירת אנרגיה תוך כדי מפץ גדול. תנ"ך עדכני היה פותח בפסוק: **בראשית היה שום דבר, ויאמר אלוהים: יהי אור. ויהי מפץ גדול, ויהי מרחב ויהי זמן ויהי מרחב־זמן.** לאף אחד אין כרגע מושג מה קרה באמת בחלקיק השנייה האפסי והראשוני של הבריאה, אך מה שברור הוא, שמתוך האנרגיה העצומה נוצרו התנאים ההכרחיים ליצירת חומר וכוחות, והחל התהליך הארוך שבסופו יושבים אנחנו, בני האדם, ומפענחים בעזרת שכלנו וחושינו את היסודות ואת אבני הבניין שמהם נוצרנו.

לפני 108 שנים, בשנת 1900, כמעט 14 מיליארד שנה לאחר המפץ הגדול, ניצב באולם הרצאות עמוס לעייפה בבניין החברה המלכותית הבריטית הלורד ויליאם תומסון קלווין בן ה־76 ונתן את אחת ההרצאות המפורסמות ביותר בתולדות הפיזיקה. בהרצאה זו ניבא קלווין את מותה של הדיסציפלינה הזו. הוא טען ששני עננים קודרים מאפילים על הפיזיקה של המאה ה־19, ואם רק נפתור אותם – לפיזיקה לא יהיה יותר מה לגלות. שני העננים הקודרים (ו"הפעוטים") עליהם דיבר קלווין היו אי־גילוי האתר – התווך שבאמצעותו, כך חשבו, מתקדמים גלי האור, ואי־ההבנה של קרינת הגוף השחור – הקרינה האחראית לאפקט החממה, שבעטיו איננו מסוגלים להישאר אפילו דקה באוטו עם חלונות סגורים בחודשי הקיץ.



אלקטרון בבית־הסוהר: הרדיוס של האלקטרון שבכדור הוא כמיליונית מעובי שערה משערת ראשנו. ככל שהאלקטרון כבד יותר, כך קטן יותר מרחב המחיה שלו, ולהפך. לו האלקטרון היה כבד יותר, האטום היה קטן יותר, סקאלת הגרעין הייתה משתווה לסקאלת האטום, וכל הדינמיקה הכימית הבין־מולקולרית הייתה משתבשת. לו האלקטרון היה קל יותר, האטומים היו גדולים ורפויים (loose), וכבר בטמפרטורות נמוכות היו המים מתאדים. לאלקטרון יש בדיוק את המסה שמאפשרת את קיומנו.

לו היה קלווין נותן את הרצאתו היום, הוא היה כנראה מספיד את הפיזיקה של המאה ה־20, בטענה שענן אחד בלבד מאפיל על שמי פיזיקת החלקיקים; רק נבין אותו, ולא יהיה יותר מה לחפש במחקר המבנה הבסיסי של החומר. השאלה שהיה מציג היא: **איך קיבלו החלקיקים היסודיים מסה?** עבורנו, חוקרי הפיזיקה של המאה ה־21, התשובה לשאלה זו הכרחית כדי לתת הסבר למה שהתרחש מייד אחרי המפץ הגדול, ולשם הבנת היקום על־פי התיאוריה המקובלת של המודל הסטנדרטי.

מיותר לציין ששני ענני המאה ה־19 גרמו להולדתן של שתי התורות החשובות ביותר בפיזיקה המודרנית, תורת היחסות הפרטית של איינשטיין, לפיה אנרגיה שקולה למסה, ותורת הקוונטים, לפיה האור בנוי מחבילות (קוונטים) של אנרגיה או חלקיקים שנקראים פוטונים. התשובה ל"עננה" המרחפת מעלינו כיום – איך מקבלים החלקיקים היסודיים מסה – תוביל ללא ספק לקפיצת מדרגה נוספת בפיזיקה ובהבנת היקום. אם צריך לתת סיבה אחת (ובהחלט יש יותר מאחת), הרי שבסרן שבשווייץ התכנסו בכירי הפיזיקאים והושקעו מיליארדי דולרים במסגרת הניסוי היקר ביותר בהיסטוריה, כדי לתת מענה לשאלה זו.

למה השאלה משמעותית כל־כך? מה אנחנו עושים כדי למצוא תשובה לשאלה? מהו חלקיק היגס ואיך יאפשר מאיץ החלקיקים בסרן לאשש את קיומו ולפענח את חידת מקור המסה של החלקיקים? מה יקרה למודל הסטנדרטי בפיזיקה אם החלקיק לא יתגלה? אתם מוזמנים להצטרף אלי למסע, שיסביר מעט ממה שעובר במוחם הקודח של פיזיקאי החלקיקים.

המפתח לטבע – מרכיבי האטום

בפיזיקה, כמו בתחומי מדע אחרים, מופיעה תיאוריה, שאם היא משכנעת את חוקרי התחום (ביופייה, בקוהרנטיות שלה, בהיקף הניבוי שלה, בחדשנות שהיא מציעה, וכדומה), היא הופכת לפרדיגמה שלטת. יכולת הניבוי של תיאוריה היא המרכיב החשוב שהופך אותה למעניינת ואטרקטיבית. תיאוריה המציגה ניבוי שניתן להעמידו לניסוי, כדי לאשש או להפריך אותה, מרכזת סביבה את מיטב הכוחות, שלצד המחקר התיאורטי ממתינים לביצוע הניסוי המכריע. כך המתין איינשטיין עם תורת היחסות הכללית עד לניסוי המפורסם של ארתור אדינגטון בשנת 1919, ניסוי שסיפק את התוצאות שחזה איינשטיין והוכיח סופית, שאור מתעקם תחת גרביטציה, בדיוק בהתאם לתיאוריה שלו.

הפרויקט הגדול בסרן הוא הניסוי שנועד לאשש, ובעצם להוכיח סופית, את המבנה המורכב שחוקרי הפיזיקה המודרנית מתארים באמצעותו את היווצרות היקום. זהו "המודל הסטנדרטי", שסביבו ובתוכו פועלים מרבית הפיזיקאים, ושלמיטב הערכתם, הוא זה המתאר נכון את החלקיקים ואת אופן פעולת הכוחות בטבע.

כדי להבין את עקרונות המודל הסטנדרטי צריך לחזור אחורה. הפעם רק 2,500 שנה.

האטום, ἄτομος ביוונית, הומצא ביוון העתיקה על־ידי הפילוסוף דמוקריטוס כחלקיק הקטן ביותר, זה שאינו ניתן יותר לחלוקה. הרעיון הבסיסי נשמר עד לסוף המאה ה־19, אז גילה ג. ג. תומסון את קיומו של האלקטרון והתברר, כי האטום מורכב הרבה יותר ממה שחשבו, וכי החלקיקים המרכיבים אותו, יחד עם היחסים ביניהם, קובעים את תכונותיו. מרגע זה מתחילה הפיזיקה המודרנית, העוסקת בחקר מבנה האטום וביקועו למרכיביו, לנסות להבין כיצד הם פועלים יחדיו ומתחברים למבנים הבסיסיים ביותר של החומר.

בבית־הספר לימדו אותנו שהאטום בנוי מגרעין חיובי של פרוטונים ונויטרונים, שהם חלקיקים יסודיים, ומחוץ לגרעין נעים האלקטרונים השליליים, שסובבים אותו במסלולים מעגליים. אין מצב כזה. ראשית, הפרוטונים והנויטרונים אינם חלקיקים יסודיים, אלא מורכבים מקוורקים. שנית, אלקטרון שנע במסלול מעגלי פולט קרינה ורדיוס הסיבוב שלו קטן והולך, כך שלכאורה, הוא היה צריך ליפול לתוך הגרעין. אם האלקטרון לא מסתובב ולא קורס פנימה, השאלה המתבקשת היא, איפה בדיוק נמצא האלקטרון סביב הגרעין?

חתן פרס נובל מוריי גלמאן, מי שטבע את השם קוורקים, שאל אותו משירו של ג'יימס ג'ויס "יקיצתו של פיניגן".

תורת הקוונטים גילתה לעולם את אחד מסודות הבריאה – עקרון אי־הוודאות. לא ניתן לדעת במדויק גם את מיקומו וגם את מהירותו של חלקיק. אי־הוודאות הזאת קְטֵנָה ככל שמסתו של החלקיק גדולה. לכן איננו מבחינים באי־הוודאות הזו בחיי היומיום. אנחנו מאוד כבדים (מסתנו אינסופית, במשקפיים גרעיניים), ולכן ניתן לזהות במדויק את מיקומנו. אבל אלקטרונים הם קלים ביותר, כמעט חסרי מסה (אלקטרון קל פי אלפיים מפרוטון או מאטום מימן), ולכן לא ניתן למקם אותם בבירור סביב הגרעין. האלקטרון, לפיכך, כלוא היכן שהוא בתוך כדור שהרדיוס שלו הוא כמיליונית מעובי שערה משערות ראשנו.

כדי להמחיש את מצבו וגודלו של האטום, נגדיל אותו עד שהגרעין שלו יהיה בגודל של גרעין שעועית. כשהגרעין בגודל שעועית, יקבל האטום את הממדים של איצטדיון כדורגל, כשהאלקטרון הוא צופה זעיר שנע בתזזיתיות בתוך האיצטדיון, בלי שניתן לקבוע בוודאות את מיקומו המדויק. יוצא מכך שהאטום הוא למעשה ריק. זו תוצאה והוכחה ברורה של עקרון אי־הוודאות של תורת הקוונטים.

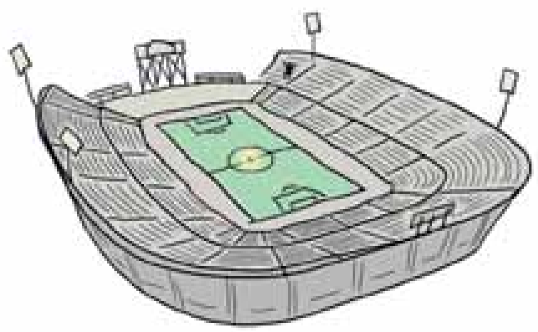
אלוהים, ברגע שנתן מסה לאלקטרון, איפשר את התחברותם של האטומים, ומכאן את קיומם של חומר, כוכבים וגלקסיות. באמצעות המסה הוא קבע את מידת הרִיק בתוך החומר והכתיב את הכימיה של החיים. מסת האלקטרון המדויקת היא המפתח ליציבות המערכת הפיזיקלית־כימית שבה אנחנו חיים.

על־פי המודל הסטנדרטי, הייתה ליקום בראשיתו סימטריה מופלאה. כל החלקיקים היו חסרי מסה, וכוח אחיד ויחיד פעל בין חלקיקי החומר. היה סדר. ביקום סימטרי כזה אין לנו מקום.

כדי לאפשר היווצרות חומר וחיים, הסימטריה הזאת הייתה חייבת להישבר. ואכן, סמוך להיווצרותו של החומר (זמן קצר מאוד אחרי המפץ), נשברה הסימטריה. האלקטרונים והקוורקים נעשו מסיביים – כלומר, קיבלו מסה. הודות למסה הזו אנחנו נמצאים כיום פה.

יצאנו לדרך בשאלה, איך קיבלו חלקיקי היסוד את המסה? על־פי התיאוריה המקובלת היום, שבירת סימטריה היא שאפשרה לחלקיקים לקבל מסה, והיא נעשתה באמצעות שדה שנקרא על שמו של הפיזיקאי הבריטי פיטר היגס. החלקיק ששדה ההיגס בורא נקרא חלקיק היגס, ובעגה יש שמכנים אותו "חלקיק האלוהים" – "The God Particle" – בשל תפקידו החשוב בתיאוריה: קיומו של ההיגס הכרחי על־פי הבנתנו הנוכחית את מערכת הכוחות והחלקיקים בטבע. בניסויים שנערכו בשנים האחרונות יש עדויות נסיבתיות לקיומו ולפעילותו

אף שהיה זה פיטר היגס הבריטי, שנתן את שמו לחלקיק ולשדה ההיגס, לפחות עוד שני פיזיקאים, פרנסואה אנגלר ורוברט ברו, היו מעורבים בתגלית, ושלושתם קיבלו בכנסת ישראל בשנת 2004 את פרס וולף היוקרתי (היגס החרים את הטקס מסיבות פוליטיות).



האטום הריק: אם נגדיל את הגרעין לגודל גרעין שעועית, יקבל האטום ממדים של איצטדיון, כשהאלקטרונים הם צופים זעירים שנעים בתזזיתיות מסביב לגרעין. למעשה, אנחנו בנויים מריק, שאומדנו מוכתב על־ידי מסת האלקטרון.

של החלקיק. הניסוי בסרן נועד, בין השאר, לברוא את החלקיק מאנרגיה באמצעות המאיץ ולנסות "ללכוד אותו" באמצעות הגלאים.

הכינוי "חלקיק האלוהים" ניתן להיגס על־ידי חתן פרס נובל לאון לדרמן. רוב הפיזיקאים מסתייגים מהכינוי, הן בגלל הקונוטציות הלכאורה דתיות שלו והן בגלל היומרנות. אני משתמש במאמר זה בביטויים תנ"כיים ובמלאכים מסיבות ספרותיות לחלוטין. אני מאמין

>>

שהפיזיקה של היקום מדהימה ביופייה, ואין פסול בשימוש בלשון פואטית כדי לחבר אותה לאנשים שבסיסם יותר הומני ורוחני. אני חושב שזו הייתה כוונתו של לאון לדרמן כשטבע את הביטוי.

לפי התיאוריה של המודל הסטנדרטי, רגע לאחר המפץ, אחרי הוואקום הבראשיתי הגדול, בטמפרטורה העצומה ששררה אז, נוצרו מתוך השדות הקוואנטיים צמדים של חלקיקים, אנטי־חלקיקים וחלקיקי אור הנקראים פוטונים. מיליארדית שנייה מאוחר יותר החל היקום להתקרר ולהירגע מעט, וניתן היה להבחין בחלקיקי היסוד המוכרים לנו היום, ובפרט באלקטרונים ובקוורקים (שמהם עשויים הפרוטונים והנויטרונים). חלקיקים אלה היו חסרי מסה. כדי שיוכלו לקבל מסה, היה צורך לשבור את הסימטריה ביקום. שבירה זו נעשתה באמצעות שדה היגס. תוך כדי היצמדות לשדה ספחו האלקטרונים והקוורקים מסה. כתוצאה מכך הפכו הפרוטונים יציבים וחברו עם נויטרונים ואלקטרונים לאטומים, בפרט לאטומי מימן והליום, ומאטומים אלו נוצרו, בסופו של דבר, הגלקסיות ואבק הכוכבים שממנו אנחנו עשויים.

שדות ויצירת חלקיקים

שדה היגס? בואו נרחיב מעט על התהליך שהתרחש וננסה להבין יותר את מושג השדה.

האלקטרון הנמצא אי־שם באיצטדיון שלנו חש את הכוח החשמלי הקיים בגרעין האטום. הוא כמו צופה באיצטדיון שמבחין בגרעין השעועית שמונח במרכז האיצטדיון. איך הוא עושה את זה בלי משקפת? למעשה, הוא לא מבחין בגרעין, אלא נלכד על־ידי "רשת" שפורש הגרעין.

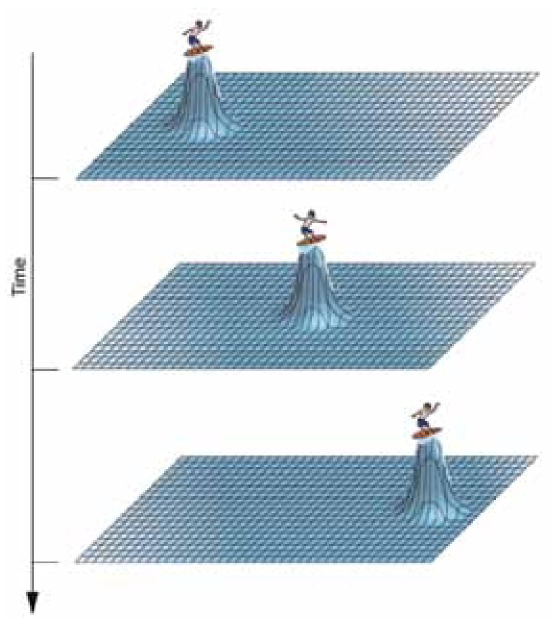
בפיזיקה לא נדבר על רשת, אלא על שדה חשמלי. הגרעין מייצר שדה חשמלי, שחש בכל מטען מסביבו ומפעיל עליו כוח. מהו אותו שדה חשמלי שבוגרי חמש יחידות בפיזיקה למדו עליו בתיכון גם אם לא כל־כך הבינו במה מדובר? לשם הדגמה, נחשוב על תנור במרכז החדר שמייצר חום. באמצעות תרמומטר ניתן למפות את הטמפרטורה בכל מקום וזמן בחדר. הפונקציה הזאת של הטמפרטורה, או המיפוי הזה, הוא שדה הטמפרטורה. יש לו ערך בכל מקום בחדר.

גם גובה פני הים הוא שדה. כשהים רגוע והדגל שעל סוכת המציל לבן, לשדה יש ערך קבוע ועלול להיות די משעמם להיכנס למים, במיוחד לגולשים שבינינו. אבל אם תעבור סירה ותחולל גל, הפרעה בשדה, הרי שהסירה תניע את פני המים מעלה ומטה, וההפרעה הזאת בגובה פני המים תתקרב אלינו במהירות ונוכל לרכוב על שיא הגל עד ליבשה. כמות המים בים לא השתנתה, אבל הפרעה בפני המים נושאת עימה אנרגיה; היא כמו כדור שמתקדם אלינו ואף מסוגל לדחוף אותנו.

באותו אופן יוצרת הפרעה בשדה החשמלי גל אלקטרומגנטי. זה מה שקורה באנטנת שידור – אלקטרון שנע באנטנה הלוך חזור, מחולל גל אלקטרומגנטי המתפשט ונקלט אצלנו במקלט הרדיו. גל מים מועבר על־ידי תנועה של מולקולות המים, אבל במה מתבטא והיכן עובר השדה החשמלי או הגל האלקטרומגנטי? מה מתנגש? מה זורם? מהו התווך בו הוא מתקדם?

זה לקח כמה מאות שנים ומוחות של ענקים (מקסוול, איינשטיין, דיראק, פיינמן ואחרים) כדי להבין, שלא צריך תווך (תורת היחסות הפרטית), ושהאור בנוי מחלקיקים – פוטונים (תורת הקוונטים). החתונה של תורת היחסות הפרטית עם תורת הקוונטים הולידה את מושג השדות הקוונטיים שפרושים על פני כול – המרחב־זמן, ושבתוכם מתקיימות הפרעות שהן תוצאתם של עירורים של השדה, שיוצרים או מחסלים חלקיקים. בשדה אלקטרומגנטי ההפרעות אינן אלא פוטונים נושאי אנרגיה. אלקטרון מתקשר עם אלקטרון אחר באמצעות היצמדותו לפוטונים. בפיזיקה מדברים על אינטרקציה או על היצמדות בין חלקיקי חומר (אלקטרונים) לחלקיקי כוח (פוטונים). במקרה של האטום, הפוטונים מתווכים בין הפרוטון שבגרעין לאלקטרון המרוחק.

תורת השדות הקוונטיים פתרה את המסתורין של הצופה המרוחק (האלקטרון), שרואה את גרעין השעועית המונח במרכז



שדות וחלקיקים: אף אחד לא ראה מעולם חלקיק יסודי. האינטואיציה עלולה להטעות. חלקיק אינו כדור קשיח בעל מידות סופיות. לפי התפיסה של הפיזיקה החדשה, חלקיק הוא הפרעה, עירור של שדה שנע במרחב־זמן; הוא כמו גל מים שנע בים שנברא במיוחד עבורו. האלקטרונים, למשל, הם עירורים של שדה האלקטרון במקומות שונים ובזמנים שונים. הפוטונים הם עירורים של שדה הפוטון, השדה האלקטרומגנטי. תנועה של פוטון ממקום אחד במרחב־זמן למקום אחר נקראת קרינה אלקטרומגנטית.

האיצטדיון. האלקטרון "רואה" את הגרעין באמצעות החלפת פוטונים בתוך שדה אלקטרומגנטי.

בשפה ציורית אפשר לומר, ש**אלוהים שברא את היקום, ברא גם את מלאכי השרת, על מנת שישַמרו את הסימטריה והיציבות**. מלאכי שרת אלה, הפוטונים, ממלאים את היקום כולו, ובמקום שהם חשים סטייה קלה מהסימטריה, הם מייד דואגים לתקן את המצב. כדי שיוכלו להגיע לכל מקום ביקום ולשמר את הסימטריה מרחב פעולתם חייב להיות אינסופי, ולכן הם חייבים להיות חסרי מסה.

אבל לצורך קיומו של היקום שלנו, **חייבים** חלקיקים רבים להיות בעלי מסה. המסות של החלקיקים האלמנטריים מכתיבות את טווח וטבע הכוחות, תוחמות את המידה של האטומים והגרעינים ומכתיבות את הכימיה של האטומים והמולקולות. אי־אפשר להפחית בערך ובתפקיד המכניזם שמקנה לחלקיקים האלמנטריים את מסתם, ושאחראי בעקיפין גם למאזן החיובי של חומר ואנטי־חומר ביקום. המכניזם הזה התרחש ברגע מסוים בהיווצרות היקום על־ידי שדה שנקרא שדה היגס, ושעירור שלו (ההפרעה הנעה בשדה) נקרא חלקיק היגס.

מה שמושך במכניזם הזה את לבם של הפיזיקאים עד כדי נכונות להשקיע מיליארדים רבים מאוד של דולרים על מנת לגלות את חלקיקי ההיגס, הוא היופי התיאורטי שטמון בחובו והעדויות הניסיוניות שכבר הצטברו לקיומו. שדה ההיגס מאפשר לתת מסה גם לחלקיקי החומר (אלקטרונים וקוורקים) וגם לפוטונים שמעבירים את הכוח הרדיואקטיבי (חלש), ה־W וה־Z. מסתו של ה־W מנובאת על־ידי מכניזם ההיגס ומהווה, למעשה, עדות נסיבתית לקיומו.

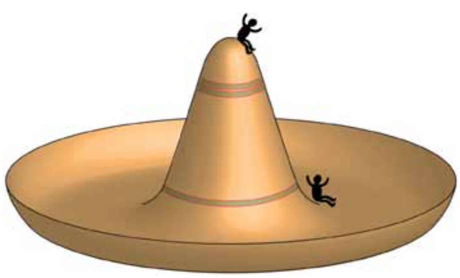
הקניית המסה נעשית בלי לשבור באופן מפורש את הסימטריה של חוקי הפיזיקה שמכתיבים את הכוחות. אני מודע לערפולו של המשפט שכתבתי זה עתה. ההסבר המתמטי פשוט יחסית, אבל ההסבר והמשמעות הפילוסופית או האינטואיטיבית מורכבים וקשים.

במגילת פרס וולף 2004 נכתב, שהפרס ניתן לאנגלר, ברו והיגס על עבודתם החלוצית, שגרמה להבנת יצירת מסה השונה מאפס בכל פעם שסימטריית כיול לוקלית מתממשת באופן א־סימטרי בעולם החלקיקים התת־אטומיים. כשהתעניינתי מדוע הניסוח כל־כך מעורפל, נאמר לי שאחרת זה לא היה נראה מספיק רציני...

הסומבררו

כשביקשתי מפרנסואה אנגלר לעזור לי להסביר את מכניזם ההיגס לקהל של הדיוטות, הוא ניסה להמציא הסבר במשך חצי שעה כמעט ונכשל שוב ושוב. קטונתי מלעמוד במקום בו גדולים ממני עמדו ונכשלו, ולכן אנסה ללכת בעקבות ההסבר המסורתי הקרוי "אינטרפרטציית הכובע המקסיקני – הסומבררו". אם לא תצליחו לעקוב אחר ההסבר, פשוט דלגו לראש הפרק הבא.

לסומבררו, במבט מהפסגה שלו (הצ'ופצ'יק שבראשו), יש סימטריה



שבירת סימטריה ספונטנית: במבט מהפסגה, לסומבררו יש סימטריה מעגלית מושלמת, שנשברת כאשר האיש הקטן מחליק למקום כלשהו בשיפולי הכובע. לחוקי הפיזיקה שפועלים על האיש שבפסגה אין כיוון מועדף, בשל אותה סימטריה, ולכן לא ניתן לצפות מראש לאן יחליק האיש. במצב האנרגטי הנמוך ביותר שלו ("שיפולי הכובע"), לשדה ההיגס יש ערך קבוע שונה מאפס ("רדיוס הכובע, מרחק האיש מהמרכז"), שבזכותו יש לחלקיקים היסודיים מסה שונה מאפס, תוך כדי שמירה על סימטריית החוקים ("סימטריית הכובע עצמו").

מעגלית מושלמת. האיש הקטן שיושב בראשו מביט סביב ורואה סימטריה מוחלטת. הוא חש את האיזון העדין שבפסגה, שכל הפרה קטנה שלו תגרום לגלישה אל שיפולי הסומבררו. לחוקי המכניקה שפועלים על האיש שבפסגה אין כיוון מועדף מפאת הסימטריה שלהם, ולכן לא ניתן מראש לצפות לאן יחליק האיש.

ברגע שיופר האיזון למעלה – למשל, אם הכיפה תרעד לחלקיק שנייה – ימצא עצמו אותו אדם באיזושהי נקודה בשיפולי הכובע, ולפתע, למרות שחוקי הפיזיקה שגרמו לנפילתו נשארו סימטריים לחלוטין, אדם זה כבר לא יימצא יותר במצב סימטרי. הוא בחר בעל־כורחו בכיוון מועדף, וכשהוא מביט לראש הכובע או לצדדיו, הוא מבחין בהבדלים סביב. אנחנו נאמר שהסימטריה נשברה באופן ספונטני.

חוקי הפיזיקה נשארו סימטריים, אבל מצב היסוד של המערכת, שבו האיש בקצה הסומבררו יציב ו"חסר אנרגיה", אינו משקף יותר את הסימטריה של החוק שהפר את איזון המערכת (הפיל את האיש).

דמיינו עכשיו שבכל נקודה – במרחב ובזמן שאופפים אותנו – יש סומבררו כזה. האיש מייצג את שדה ההיגס ("השדה של אלוהים"), גובהו על פני הכובע מייצג את האנרגיה של השדה, ואילו מיקומו על פני הכובע (הרדיוס שלו, מרחקו ממרכז הסומבררו) מייצג את עוצמת השדה.

ליקום ברגע בריאתו יש אנרגיה עצומה וטמפרטורה עצומה. לאיש שעל הסומבררו לא נוח. הוא נע בתזזיתיות ימינה ושמאלה, קדימה ואחורה, מחפש מקום נוח להחליק ממנו, אבל לא מוצא. הטמפרטורה העצומה מחזיקה אותו בראש הסומבררו. במצב זה

>>



שבע תת־קבוצות היגס – שבעה בקבוקי שמפניה. ביום הגילוי פתחנו שבעה בקבוקי שמפניה לסמל את שבע קבוצות החיפוש באטלס.



עילם גרוס (במרכז) ועמיתיו, אלכס ריד (מימין), אחראי על ניתוח הנתונים הסטטיסטיים באטלס, ומרומי קאדו (שמאל), השותף החדש של גרוס לניהול קבוצת ההיגס באטלס.

>> עוצמת השדה הממוצעת היא אפס, אבל האנרגיה גבוהה. היקום מתקרר, ופחות ממיליארדית השנייה אחרי המפץ הגדול מצליח אותו אדם למצוא מנוחה איפה שהוא בשיפולי הכובע. שדה ההיגס במינימום אנרגיה, אבל עוצמתו קבועה ואינה אפסית, מה שעושה אותו נוכח ומורגש. הסימטריות של הכוחות בטבע נשארו כמות שהן, אבל מצב היסוד של הטבע עצמו (שהיה בראש הסומברררו) איבד את הסימטריה שלו. הסימטריה נשברה באופן ספונטני, ושדה ההיגס בחר כיוון מועדף תוך כדי קבלת עוצמה קבועה ששונה מאפס. כדי להשלים את התמונה נציין שלשדה ההיגס מטען חלש (רדיואקטיבי), שמאפשר לחלקיקי החומר, כגון האלקטרונים והקוורקים, לחוש בערך השדה השונה מאפס ולרכוש לעצמם מסה. חלקיקים ללא מטען חלש אדישים לשדה ההיגס, ולכן הפוטונים, למשל, נשארים חסרי מסה (וחוק שימור המטען החשמלי נשאר תקף), ואילו ה־W וה־Z, מתווכי הכוח החלש, שנושאים מטען חלש, רוכשים גם הם מסה. יתרה מזאת, היות שגם להיגס מטען חלש, הוא נצמד לעצמו, חש בקיומו שלו עצמו ומקנה לעצמו מסה, שכרגע, אגב, אין לנו מושג מהי.

וכך, שדה ההיגס שבחר לעצמו כיוון מועדף עם עוצמה שונה מאפס במצב היסוד שלו, נתן מסה גם לפוטוני הכוח החלש – W ו־Z (והגביל בכך את טווח הכוח החלש), גם לאלקטרונים (מה שאיפשר את התחברותם של אטומים ואת הכימיה, כפי שהיא מוכרת לנו), וגם לקוורקים (שקיבלו את המסה הנחוצה ליציבותם של הפרוטונים). אם שדה ההיגס יאבד את עוצמתו הקבועה במרחב ובזמן, יחזרו כל החלקיקים להיות חסרי מסה, והיקום הנצפה שאנחנו מכירים יהפוך להיות בלתי אפשרי. **שדה היגס הוא, לכן, "מלאך שומר", המקנה לחלקיקים היסודיים את המסות הנדרשות לקיומו של היקום, ואנחנו בתוכו.**

השלמת הפאזל

המכניזם הזה, שבו מוקנית המסה על־ידי שבירת הסימטריה הספונטנית, התגלה בשנות השישים של המאה העשרים. הוא ניבא במדויק את מסתם של נושאי הכוח החלש, ה־W וה־Z, והללו אכן התגלו ב־1983 בדיוק במסה הצפויה. המכניזם הזה הוא שמנבא את קיומו של חלקיק ההיגס הנעלם והמסתורי.

אזכיר כאן אנלוגיה מאוד פופולרית, שאני אישית לא נמנה עם חסידיה. בשנת 1993 איתגר שר המדע הבריטי את קהילת המדענים הבריטים והבטיח בקבוק שמפניה למדען שיצליח להסביר לו על גב מעטפה מהו אותו חלקיק היגס, ולמה שווה להשקיע מיליארדי דולרים כדי לגלותו. ההסבר המנצח היה של דייוויד מילר: שדה היגס על עירוריו, חלקיקי ההיגס, (הוא כמו קהל רב של אנשים שמסתובבים באולם ממלאים את היקום). לאולם נכנס איש חשוב (חלקיק – למשל, אלקטרון), נאמר ראש הממשלה. תנועתו פשוטה ומהירה. האנשים באולם מתקרבים אליו כדי לראותו וליהנות מקרבתו, ויוצרים בועה סביבו. תנועתו נעשית כבדה ואיטית, ובמובן זה הוא רכש מסה, שהרי ככל שמסה של גוף גדולה יותר, כך קשה יותר לשנות את מצבו הנתון. ככל שהחלקיק שנכנס לחדר "חשוב" יותר, כך ייצמד אליו שדה ההיגס חזק יותר ויקשה יותר על תנועתו. באותו אופן אפשר לדמות את שדה ההיגס גם לנוזל שממלא את היקום. תנועתם של החלקיקים שנעים בנוזל מואטת עקב צמיגות הנוזל, והם רוכשים מסה.

אם נסכם את המודל שתיארנו לעיל, היקום נוצר מחלקיקי חומר טעונים במטען חשמלי ורדיואקטיבי, כולם חסרי מסה, שנצמדים זה לזה באמצעות חלקיקי כוח חסרי מסה – פוטונים. שבירת סימטריה ספונטנית מקנה מסה הן לחלקיקי החומר, האלקטרונים והקוורקים, והן לפוטוני הכוח החלש, ה־W וה־Z, וכל זאת בלי לפגום מפורשות בסימטריה של חוקי הטבע, שהופכת להיות "חבויה".

המודל שלנו בנוי מאבני היסוד של הטבע, שהם, בעיקרון, כל חלקיקי החומר: שישה קוורקים, שלושה אלקטרונים עם הנויטרינו שנצמדים אליהם, הפוטון, ה־W וה־Z, ואחרון חביב – חלקיק ההיגס. כולם יחד מרכיבים פאזל בן 17 חלקים (אבני היסוד של היקום שלנו). תכונות החלקיקים, המסה שלהם והמטענים השונים מהווים מעין קוד גנטי של האינטרקציות ביקום, שמתקשרות בין חלקיקי החומר השונים על־ידי פוטוני הכוחות השונים.

הבעיה היא שכשניגשנו לחבר את הפאזל, מצאנו שחסרה בו חתיכה. כולם חיפשו בקופסה את החתיכה החסרה, ובכל זאת, החתיכה שעליה רשום היגס-H – לא נמצאה. המבנה התיאורטי שבנינו לא הושלם. הפיזיקאים החליטו שאין ברירה אלא להתקשר ליצרן ולבקש את החתיכה החסרה. על הקופסה היה כתוב שהפאזל נוצר כעשירית מיליארדית השנייה אחרי המפץ הגדול, ונראה היה שבלתי אפשרי להגיע ליצרן. לא נותרה ברירה אלא לנסות ולהתכתב עם היצרן האלמוני, באמצעות ייצור החתיכה החסרה בתהליך שמשחזר את חלקיק השנייה שאחרי המפץ הגדול.

בז'נבה שבשווייץ נבנתה במימון ובשיתוף בינלאומי מנהרה, שבה ייצרו אלפי מדענים סביבה דומה ככל האפשר למצב היקום עשירית של מיליארדית השנייה אחרי המפץ הגדול. בסביבה זו הם מקווים לנסות לברוא את החלקיק החסר.

לראות את היגס

כדי "לראות" את חלקיק ההיגס צריך, קודם־כול, לברוא אותו מאנרגיה באמצעות השדה שלו, ואחר־כך לגלות אותו באמצעות גלאי חלקיקים. גלאי החלקיקים הפשוט ביותר שאתם מכירים הוא אתם עצמכם, או ליתר דיוק, העין שלכם. >>

העין מגלה פוטונים של אור באמצעות קליטתם והמרתם לאותות שמגיעים למוח שלנו, שמעבד אותם ויוצר מהם תמונה. אין שום הבדל עקרוני בין העין שלנו לגלאי שנבנה בז'נבה, ואשר נועד לגלות את חלקיק ההיגס, למעט העובדה שזה האחרון הוא גלאי משוכלל הרבה יותר מהעין שלנו, כי הוא מסוגל לגלות הרבה מעבר לפוטונים בתחום הנראה. הגלאי שנבנה בז'נבה הוא מעין עין ביונית.

שני גלאים נבנו ב־LHC לגילוי ההיגס: CMS ו־ATLAS. ישראל חברה ב־ATLAS, ובמאמר זה, למרות כלליותו, הדוגמאות והתצלומים מתייחסים ל־ATLAS.

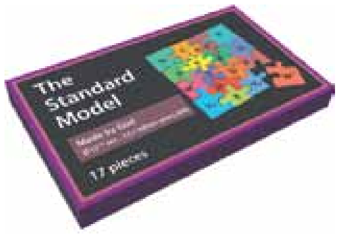
גילוי החלקיקים מתבצע על־ידי "העין הביונית", שמטרתה לזהות, בנוסף לפוטונים, גם קוורקים, גלואונים, אלקטרונים, מיואונים (אלקטרונים כבדים) וכו'. הזיהוי נעשה על־ידי המרת האנרגיה של החלקיקים במסלולם לאותות אלקטרוניים שמועברים למחשב. המרת האנרגיה לאותות מתבצעת על־ידי עצירתם וספיגתם בגלאי (פרט למיואון, שהוא החלקיק היחיד שמשאיר את עקבותיו בגלאי עד לצאתו מחוץ לגלאי, והנויטרינו, שלא משאיר שום עקבות). עצירתם של חלקיקים אנרגטיים כל־כך מחייבת גלאי עצום, שאורכו כ־50 מטרים וגובהו 25 מטרים, כגובהו של בניין בן שבע קומות.

הסיבה לכך שלא גילינו עד היום את חלקיק ההיגס היא, שכדי לברוא אותו, יש להשקיע אנרגיה ששווה לפחות למסתו, ויש צורך לברוא כמה וכמה חלקיקי היגס על מנת שנשתכנע בגילויו. עצם העובדה שלא גילינו עד היום את חלקיק ההיגס במאיצים הקיימים מצביעה על כך, שהוא כבד יותר מהאנרגיה שהייתה נתונה בידינו על מנת לברוא אותו.

אלפי פיזיקאים התכנסו, לכן, לבנות את ה־LHC – מאיץ חלקיקים חדש – מאיץ פרוטונים. הפרוטון כבד פי 2,000 מהאלקטרון, ולכן ההתנגשות בין שני פרוטונים עוצמתית פי כמה וכמה. אם נדמה את האלקטרונים לשני זוגות אופניים מתנגשים, הרי הפרוטונים הם כמו שתי משאיות ענק עמוסות חומר נפץ, שמתנגשות זו בזו בעוצמה רבה. הסיכוי ליצירת ההיגס בהתנגשות פרוטון בפרוטון הוא 1:1,000,000,000,000 – כלומר, היגס אחד על כל טריליון התנגשויות. יוצא מכך שאם ברצוננו לגלות את ההיגס, יש ליצור טריליוני התנגשויות בין פרוטונים לפרוטונים, וזאת באנרגיות גדולות דיין.

פרוטונים שייכים למשפחה של חלקיקים הנקראים הדרונים, ולפיכך: LHC – Large Hadron Collider.

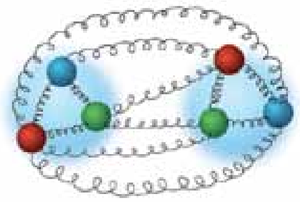
מאחר שהפרוטונים כמעט נקודתיים, קשה מאוד למקד אותם כך שיפגעו זה בזה. לכן מגדילים את סיכויי ההתנגשות באמצעות יצירת אלומה של פרוטונים, שמורכבת מצרורות שבכל אחד מהם קרוב לטריליון פרוטונים. צרור כזה יהיה כסיכה ארוכה באורך של כשבעה סנטימטרים ובעובי של כ־15 מיקרונים – עובי שערה. בסופו של דבר יהיו כמיליארד פרוטונים שיתנגשו במיליארד פרוטונים בכל שנייה.



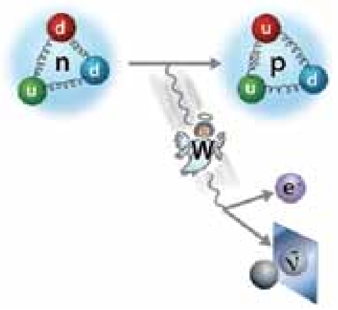
הפאזל של המודל הסטנדרטי נוצר Made by God © 000000000.1 sec ABB **עשירית של מיליארדית השנייה אחרי המפץ הגדול,** After the Big Bang**, יחד עם החתיכה החסרה, חלקיק ההיגס.**



פאזל המודל הסטנדרטי: כל החלקיקים היסודיים יכולים להרכיב פאזל פשוט שאף ילד יוכל להרכיב אותו, אלא שחתיכה אחת חסרה.

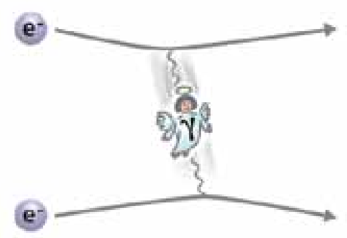


קוורקים בבית־הסוהר: כל פרוטון בנוי משלושה קוורקים נושאי מטען שקרוי צבע: אדום, כחול או ירוק. הקוורקים נצמדים זה לזה באמצעות החלפת גלואונים, ה"מלאכים" שמשמרים את הצבע הלבן של הפרוטון (אדום+כחול+ירוק=לבן). מאחר שגם הגלואונים נושאים מטען של צבע, הם תוחמים את הקוורקים בפרוטון ולא ניתן למצוא קוורק חופשי. באמצעות הגלואונים יוצרים הקוורקים בפרוטון אחד אינטרקציה עם הקוורקים בפרוטון השכן בגרעין, שתוצאתה קשר משיכה. הגלואונים אחראים, לפיכך, לכוח המשיכה החזק בין פרוטון לפרוטון, שגדול עשרת מונים מכוח הדחייה החשמלי. אנרגיית הקשר העצומה של הגלואונים בינם לבין עצמם אחראית גם לרוב המסה של הפרוטונים והנויטרונים.



חלקיק ההיגס, "המלאך השומר": נויטרון ופרוטון נבדלים זה מזה בהרכב הקוורקי. נויטרון בנוי משני קוורקים מטיפוס d ואחד מסוג u, ואילו הפרוטון בנוי משני קוורקים מטיפוס u ואחד מסוג d. ההפרש הזעיר (בשיעור של כ־0.2%) במסות לטובת הנויטרון נובע מההבדל בין מסות ה־u וה־d. מסות הקוורקים מוקנות על־ידי שדה ההיגס. אלמלא קוורק ה־d היה כבד מה־u, הפרוטון לא היה נשמר יציב אלא דועך לנויטרון, ואנחנו, כפי הנראה, לא היינו פה. שדה ההיגס שומר על הפרש המסות החיוני הזה. התהליך המותר בטבע הוא התהליך הרדיואקטיבי.

נויטרון חופשי דועך תוך כ־13 דקות לפרוטון, אלקטרון ואנטי־נויטרינו. הדעיכה מתעכבת כי המתווך של הכוח הרדיואקטיבי, "מלאך השרת" של הסימטריה החלשה (שאינה מבדילה בין נויטרון לפרוטון), ה־W, הוא מסיבי, ולכן טווח האינטרקציה קטן אפילו ממְמדי גרעין.



הפוטונים: "מלאכי השרת" שמשמרים את הסימטריות, לפי התפיסה של הפיזיקה החדשה. הכוח החשמלי בין שני אלקטרונים מועבר על־ידי פוטונים, שתפקידם לשמר סימטריה. כל שמירת סימטריה מתבטאת בטבע בחוק שימור. במקרה זה נשמר, וכמובן המטען החשמלי.

עקב מסתו הכבדה, כשנוצר ההיגס יש לו מספיק אנרגיה עצמית שמאפשרת לו להתפרק לחלקיקים קלים יותר ממנו. לכן הוא מייד מתפרק לקוורקים כבדים או לנושאי הכוח החלש, ה־W וה־Z (שהם עצמם מתפרקים לקוורקים, אלקטרונים ומיואונים). סביב נקודת ההתנגשות נבנה גלאי שמטרתו לגלות את תוצרי ההתנגשות הללו ולהמיר את המסלולים שלהם לאותות אלקטרוניים. אלה מועברים למחשב בצורת בייטים המתורגמים ל"תמונות", שהפיזיקאי המיומן יודע לתרגם ולזהות מתוכן את חלקיק ההיגס המתפרק.

אפילוג

ומה ייצא לנו אם נמצא את ההיגס? מה יקרה אם לא נמצא אותו? שאלות כאלה ואחרות נשאלות בחדרי־חדרים וגם מחוצה להם. עלינו לזכור שמדובר במדע צרוף. מדענים רואים תמונה מלאה לעמלם המחקרי בעצם העמקת הידע האנושי והבנת מבנה היקום, על חוקיו ותכולתו. הממשלות והסוכנויות המממנות רוצות גם לראות תוצאות בעלות ערך שימושי. אף אחד לא יודע באמת כמה עלה לבנות את ה־LHC. מדובר במיליארדי דולרים, וזאת בלי לקחת בחשבון את עלויות כוח האדם. בהשקעה כזאת לגיטימי לשאול, "מה ייצא מזה?" ו"מה יקרה אם לא יימצא דבר?"

במהלך השנים בהן ניסה תומסון לאתר את האלקטרון, הוא ספג ביקורת רבה על חוסר הפרקטיות של המחקר שלו, ועל כך שהוא מחפש חלקיק כה קטן, שאיש לא יראה אותו לעולם. משגילה את האלקטרון בשנת 1897, הוא הרים כוסית ובירך: To the useless electron. האם מישהו מטיל כיום ספק בחשיבות הגילוי הוא? איפה היינו היום ללא גילוי האלקטרון וכל מה שבא אחריו? מדע צרוף לא נותן את תוצאותיו באופן מיידי, בדרך־כלל. חולפות לעתים עשרות שנים עד שאנחנו מבינים את מהותה של תגלית כלשהי ומה ניתן לעשות איתה, וזאת מעבר לתועלת המיידית והצרופה שיש בהעמקת הידע.

קשה מאוד לענות על השאלה, "ומה אם לא נמצא את ההיגס?" מרבית הפיזיקאים שעובדים בפרויקט, כלל לא עוסקים בשאלה זו. עבורם, עצם העובדה שהמודל התקני (סטנדרטי), על ההיגס שבתוכו, כבר הניב תצפיות שהתאמתו באופן ניסיוני, מצביעה על קיומו באופן שלא ניתן לערעור. יתרה מזאת, המסה של נושאי הכוח החלש, ה־W וה־Z, שהתגלו כבר לפני למעלה מ־25 שנה, מהווה באיזשהו מקום מעין צל שמוטל על־ידי ההיגס לאורו של המודל התקני. הייתכן שאנחנו רואים צל, בלי שיהיה לו מקור או בלי שנוכל לזהות את הגורם שהטיל אותו?

פיזיקאים אחרים בטוחים שבלי קשר להיגס, יתגלו בניסוי הייחודי חלקיקים חדשים ואינטרקציות שלא הכרנו בין החלקיקים – כאלה שיעניקו לנו יכולות ניבוי והבנה מסוג חדש.

אני נמנה עם המשוכנעים שבתוך שנים ספורות ביותר יתגלה, לפחות, ההיגס, אחרת לא הייתי מבלה את עשרים השנים האחרונות בחיפוש אחריו. ולמה אמרתי "לפחות"? כי אם נסתכל על הפאזל של המודל התקני, נראה שהחתיכות מתחברות יפה, אבל יש רווחים קטנטנים בין חתיכה לחתיכה. אם נסתכל במיקרוסקופ חזק (כמו ה־LHC) על החתיכות עצמן, נגלה שהן בנויות מאבני בניין קטנות יותר. לכן יש מדענים שסבורים שגילוי ההיגס הוא ודאי, והוא מהווה רק את קצה הקרחון.

ובכל זאת, והיה אם לא? קשה לי לענות על כך. המודל התקני בהחלט יעמוד בפני שוקת שבורה. לתיאורטיקנים תהיה עבודה רבה, ודלתות קרנות מימון המחקר של המבנה היסודי של החומר עלולות להיסגר בפני עורכי הניסויים שבינינו. לא ייתכן, זה לא יקרה. **ההיגס יתגלה.** Mark My Words.

אבק כוכבים במחיר מבצע

האפשרות לצאת לחופשה בחלל נראתה בעבר כחלום דמיוני. היום מדובר באפשרות ריאלית, בעיקר למולטי־מיליונרים, אך בעתיד ייתכן שכל אחד מאיתנו יוכל לתפוס קצת אבק כוכבים במחיר מבצע. ד"ר נח ברוש מסביר כיצד צפויה להשתנות תיירות החלל בתוך שנים ספורות ומעריך מתי הנופשים יגיעו עד למאדים

"עד גיל 21 תגיע לירח", קבעו פעם העתידות של גומי לעיסה נפוץ. אמירה זו, שנשמעה דמיונית אז, הולכת ומתממשת בשנים האחרונות. הטיסות לחלל אינן עוד נחלתם של בכירי הטייסים של מעצמות חזקות; כיום גם בעלי ממון מגיעים לחלל, ובעתיד הלא־רחוק לא רק מולטי־מיליונרים יגיעו לשם, אלא גם בני מעמד הביניים.

המשתנה החשוב שקובע את אפשרות הגישה לחלל, בין אם לשם הצבת מכשירים ובין אם לשם הטסת אנשים, הוא העלות של הטסת מטען של קילוגרם אחד במסלול נמוך – כלומר, כמה מאות קילומטרים מעל פני כדור הארץ. כיום עלות זו עומדת על יותר מ־10,000 דולר לקילוגרם, כשמשתמשים בטילי שיגור מערביים כגון האטלס האמריקאי או האריאן האירופי. העלות מוזלת במקצת כאשר עושים שימוש בַּמשגרים רוסיים או הודיים. בחישוב עלות שיגורו של אדם לחלל יש לכלול לא רק את משקל גופו, אלא גם את מסת המושב שלו, את החמצן שהוא נושם, את המים והמזון וכל שאר מה שנדרש לצורך קיום בחלל (מערכות חימום וקירור התא, הגנה מקרינה קוסמית, ועוד). בסך־הכול מדובר בהרבה יותר מ־100 ק"ג להטסת אדם בודד. לכן, טיסת חלל מאוישת היא עדיין עסק יקר ביותר, שעלותו עשרות מיליוני דולרים (שיגור מעבורות החלל, שהשימוש בהן הסתיים, עלה בין 300 ל־500 מיליון דולר).

כדי לשנות את המצב הזה קמו לאחרונה מספר חברות, שמציעות גישה שונה לבניית הרכיבים הדרושים. המשמעות היא הוזלה ניכרת של עלויות הטיסה לחלל.

הראשונה לעשות זאת הייתה וירג'ין גלאקטיק (Virgin Galactic), שהודיעה כי תתחיל להפעיל טיסות מסחריות תת־מסלוליות סדירות, שיעלו את רוכשי הכרטיסים לגובה של מאה ק"מ ויותר מעל לקרקע. בנקודה זו הם יחושו "חוסר משקל" במשך דקות אחדות. העלות של התענוג: כ־200 אלף דולר לאדם. החברה דיווחה לאחרונה כי מכרה יותר מ־400 "כרטיסים" לטיסות אלה. סוכנות החלל הרוסית אפשרה עוד לפני כן לצרף נוסעים לטיסות החלל שלה, בעלות של עשרות מיליוני דולרים לאדם. על ה"מציאה" היו גם קופצים: עד היום שבעה בעלי ממון כבר טסו בחלליות הרוסיות ובילו בין שבוע לשבועיים בתחנת החלל הבינלאומית. הכנסות נוספות אלה סייעו רבות לתעשיית החלל הרוסית בתקופת הצנע של סוף המאה העשרים.

כיום עמלות מספר חברות אמריקאיות על פיתוח טילים וחלליות לטיסות חלל מסחריות, ביניהן ניתן לציין את ספייס X, שפיתחה טילי שיגור מתקדמים. אחד מאלה הביא לא מזמן את החללית דראגון (Dragon) אל תחנת החלל הבינלאומית עם מטען אספקה. עם הפסקת טיסות המעבורות, טיל זה ודומיו הם אלה שיחזירו בעתיד את ארצות־הברית לפעילות מלאה בחלל. ספייס X חתמה על חוזה עם סוכנות החלל האמריקאית נאס"א, לפיו תטיס מטענים אל תחנת החלל תמורת 1.6 מיליארד דולר ל־12 טיסות אספקה, כך שהיא יכולה לבנות על הכנסות עתידיות משירותי חלל. דרך אגב, המשגרים של ספייס X מוזילים בשמונים אחוז את

>>



איור: אסנת פייטלסון / Flickr: DovKotev
מתוך פרויקט: Voyages Extraordinaires



תמונה מס' 1: החיים בתחנת החלל הבינלאומית (ISS). הרוסי קוננקו (Kononenko) במרכז, האירופי קויפרס (Kuipers) משמאל והאמריקאי פטיט (Petit) מימין, בתנאי חוסר משקל, במרכז היחידה "איחוד" של ה־ISS.

"סביר לחשוב שאם לא תתרחש קטסטרופה עולמית, יצליחו יזמים כגון מוסק וביגלו לדחוף את תעשיית החלל הפרטית להישגים נכבדים יותר ויותר. הטיסות למאדים יחלו תוך עשור או שניים, ומושבה קבועה שם תקום אולי תוך עשור נוסף. אחדים מהמבוגרים כיום יזכו לראות את הקמת המושבה, שצפויה לגדול בהדרגה עד לממדי יישוב קטן"

<< עלות השיגור לקילוגרם ביחס למשגרים מערביים אחרים. בעתיד מתכננת ספייס X להשתלב בשוק המשגרים האמריקאי, שכולל היום רק חברה מקומית אחת: United Launch Alliance (ULA) – שיתוף פעולה בין בואינג לבין לוקהיד־מרטין, שתי חברות ענק השולטות על תעשיית התעופה האמריקאית.

ספייס X היא דוגמה לפעולה אישית נמרצת של אדם היודע למה הוא שואף. האמריקאי יליד דרום־אפריקה אלון מוסק (Elon Musk) הוא יזם בתחום התוכנה, שהגה ובנה את אתר התשלומים PayPal וכעת משמש כיו"ר החברה שבונה חלליות וטילי שיגור. מעברו של מוסק לפעילות בתחום החלל נובע מאמונתו כי עתיד המין האנושי נמצא מחוץ לכדור הארץ, והוא שואף להיות שותף לתקווה להטיס אנשים על החלליות שלו אל המאדים. עד כה מתקדמת הפעילות של ספייס X כהלכה, והיא משמשת דוגמה למיזמי חלל פרטיים אחרים.

דירת חמישה חדרים בחלל

ביגלו אירוספייס (Bigelow Aerospace) היא דוגמה נוספת לגישה החדשה בנושא טיסות החלל. חברה אמריקאית זו נוסדה ב־1998 על־ידי יזם הנדל"ן רוברט ביגלו מדרום ארצות־הברית, שחזונו, כשל אלון מוסק, הוא לחולל מהפכה בתחום הטיסות לחלל. החברה מתמחה במבני חלל מתנפחים, שיכולים לשמש למגורי אסטרונאוטים או תיירי חלל. ב־2006 וב־2007 שיגרה החברה למסלול נמוך סביב כדור הארץ שני מבנים מתנפחים ניסיוניים שאורכם 4.4 מ' וקוטרם יותר מ־2.5 מ'. החברה מתכננת לפתח ולשגר לחלל יחידות גדולות יותר, וכרגע נמצא בפיתוח ה־BA-330, מבנה מתנפח שאורכו כ־14 מ' וקוטרו כמעט 6 מ'. מבנה כזה יציע לששת הדיירים בו נפח של כ־330 מ"ק, שווה־ערך לדירה הכוללת חמישה חדרי שינה. לשם השוואה, ליחידה אחת מאלה המרכיבות את תחנת החלל הבינלאומית יש נפח הגדול במקצת מ־100 מ"ק. ניתן יהיה לחבר שלושה מבנים של BA-330 כדי ליצור את בסיס הירח הראשון עליו חולם ביגלו, שבו יעבדו עד 18 אסטרונאוטים.

ביגלו מתכננת לשגר את הדגם הראשון של ה־BA-330 כבר ב־2015. בעתיד ניתן יהיה לחבר יחידות כאלה לתחנת חלל חדשה, ואף לשכן בהן את תיירי החלל שספייס X תעלה למסלול. הצעד הבא יהיה שיגור מבנה גדול פי־שישה מה־BA-330, המכונה BA-2100, שנמצא אף הוא בתכנון. מבנה ענק כזה (עם נפח של 2,100 מ"ק בגליל שאורכו כ־18 מ' וקוטרו כמעט 13 מ') יכול לשמש כ"מלון חללי" למספר גדול של תיירים, ואם יחברו מספר יחידות יחד, אף כבסיס חללי מתקדם.

תענוג בן חמש דקות

הבה נתאר לעצמנו את התנהלות החיים בסוגי האטרקציות החלליות שיוצעו לציבור בשנים הקרובות. תחילה יוצעו למחפשי הריגושים הטיסות של וירג'ין גלאקטיק, שיעלו אותם יותר מ־100 ק"מ מעל לקרקע. הבדיקות הרפואיות והאימונים לקראת הטיסה באתר החברה יימשכו שלושה ימים, במהלכם יזכו הנוסעים לטיסת היכרות במטוס הענק "אביר לבן 2" (WhiteKnight 2) שמעלה את כלי הטייס החללי SpaceShip 2 (SS2) לגובה של כ־18 ק"מ (הרבה מעל לגובה הטיסה של מטוסים אזרחיים) ומביא אותו



תמונה מס' 2: כלי הטיס של וירג'ין גלאקטיק מורכב ממטוס השיגור הענק "אביר לבן 2" ומכלי הטיס החללי SS2 שמחובר באמצעו. צילום: MARK GREENBERG



תמונה מס' 3: המשגר הכבד הנוכחי של ספייס X הוא הפלקון 9. צילום: נאס"א

לנקודת השיגור. טיסת היכרות כזו תתבצע יממה לפני הטיסה התת־מסלולית.

לאחר שלושת ימי ההדרכה ששת הנוסעים המיועדים לטיסה ילבשו חליפות חלל אופנתיות, מיוחדות לווירג'ין גלאקטיק, שעליהן מצלמות וחיישנים לתיעוד מלא של חוויית הטיסה. זאת בנוסף למצלמות רבות שיפוזרו ברחבי תא הנוסעים לתיעוד דומה. "אביר לבן 2" יגיע לגובה השיגור, ואז תתנתק ממנו החללית SS2 ותפעיל את המנוע הרקטי, שיאיץ את החללית למהירות הגבוהה פי־3.4 ממהירות הקול תוך כ־30 שניות. לאחר דקה וחצי תופסק פעולת המנוע הרקטי וה־SS2 תשייט בצורה אנכית – בדיוק כמו אבן שנזרקה כלפי מעלה. ה־SS2 תאט בגלל כוח המשיכה של כדור הארץ, כשהיא נשלטת על־ידי שני הטייסים. מרגע כיבוי המנוע יימצאו הנוסעים בתנאי "חוסר משקל". הם יתנתקו מרתמות הבטיחות ויתחילו לרחף בתוך החללית, בסיוע אחד הטייסים, תוך כדי צפייה בנוף שנגלה להם מ־12 החלונות הענקיים.

מצב הריחוף החופשי יימשך עד כחמש דקות. לאחר פרק זמן זה ייקראו הנוסעים לשוב למושביהם ולחגור את רתמות הבטיחות, בטרם תתחיל החללית SS2 את חזרתה לאטמוספרה. תהליך הנחיתה יתבצע תוך כדי בלימת החללית, ש"תיפול" מטה כאשר כנפיה ניצבות לכיוון התנועה. במשך תהליך הבלימה הנוסעים ירגישו איך משקל גופם עולה מ־0 עד לפי־תשעה מהמשקל הרגיל (בגלל כוחות הבלימה). בתום התהליך, כשעתיים וחצי לאחר ההמראה, תנחת החללית בנמל החלל ממנו המריאה. מלבד החוויה האישית והזיכרונות יישארו ברשות הנוסעים חליפת החלל והסרטים המתעדים את ההכנות ואת הטיסה עצמה, כדי שיהיה



תמונה מס' 4: דגם בקנה מידה 1:1 של תחנת חלל של חברת ביגלו באתר החברה בארה"ב. הדגם מורכב משלוש יחידות של BA־330. צילום: נאס"א

להם במה להתפאר בפני המשפחה והחברים.

טיסות חלל אחרות, ארוכות יותר, ישוגרו כנראה עם המשגר שכבר הוכיח את עצמו – הפלקון, על דגמיו השונים, של חברת ספייס X. ספייס X פיתחה את תא הדראגון, שמורכב בחרטום הטיל ומשמש כיום להטסת מטענים אל תחנת החלל הבינלאומית. החברה מפתחת גירסה ניתנת לאיוש של הדראגון, שבה יטוסו עד שבעה אסטרונאוטים במושבים דומים לאלה של חלליות אפולו, ששוגרו בסוף שנות השישים של המאה הקודמת אל הירח.

ויש גם אטרקציות מיוחדות: החברה של אלון מוסק משתפת >>

>> פעולה עם חברת ביגלו כדי לקדם את נושא המלון החללי, וכנראה שתא דראגון על גבי טיל פלקון יטיס בעתיד גם את הנוסעים אל מלון מסלולי (מלון המקיף את כדור הארץ), לטיסות חווייתיות מסביב לירח ואולי גם אל בסיס הירח שתקים ביגלו. במקביל, קמה ברוסיה לאחרונה חברה שמתכננת להציב בחלל בית־מלון מסלולי לעשירים, שיוכלו לשהות בו בין מספר ימים למספר חודשים.

אל תמהרו להזמין נופש במאדים

הטיסות המאוישות למאדים רחוקות עדיין, ולא לכל הבעיות הצפויות יש מענה. למשל, לא ברור איך אסטרונאוטים (או תיירי חלל, בעתיד הרחוק יותר) יחזיקו מעמד בטיסה שתימשך חודשים, ולא ימים, כפי שנמשכת טיסה לירח. אחת הבעיות היא התקשורת: כדור הארץ ומאדים נעים במסלולים שונים סביב השמש, ובחלק מהמצבים המרחק בין שני הגופים כה גדול, עד שלגלי הרדיו (הנעים במהירות האור) יידרשו בין 3 ל־22 דקות לעבור בין החללית לבסיס האם על כדור הארץ. ברור שבתנאים אלה לא תיתכן שיחה רגילה, שבה השאלות והתשובות עוקבות באופן רציף אלה אחר אלה. לכן, בעוד שאת חלליות אפולו שטסו לירח איישו שלושה אסטרונאוטים, סביר להניח כי טיסות למאדים יכללו מספר רב יותר של אסטרונאוטים, קוסמונאוטים או טאיקונאוטים (taikonauts – טייסי החלל הסינים), בנוסף



תמונה מס' 5: כנראה שחליפת החלל האישית של וירג'ין גלאקטיק תיראה כך.

לנוסעים מן השורה, כדי לגוון ככל האפשר את הרשת החברתית הפנימית.

כאשר יתגברו על כל בעיות הטיסה הארוכה ויצליחו להנחית צוותים אנושיים על מאדים, ניתן יהיה לחשוב ברצינות גם על הקמת מושבה שם. אחד המקומות המועדפים למתקן כזה (שצריך להגן היטב על תושביו מקרינה קוסמית וממטאוריטים ולהעניק אווירה ממוזגת) הוא בתוך "צינורות לבה" – מבנים גיאולוגיים ארציים שזוהו גם במאדים. מבנים אלה נוצרים כתוצאה מזרימה מהירה של לבה מותכת, המתקררת בדפנות ויוצרת צינור אבן מוצק וחזק. כאשר הפעילות הגעשית נפסקת, והלבה שנפלטה לאחר היווצרות הצינור המוצק לו, נשאר צינור אבן ריק שקוטרו מטרים אחדים, ובתוכו ניתן לבנות את המושבה האנושית על־ידי סידורי פנים פשוטים.

סביר לחשוב שאם לא תתרחש קטסטרופה עולמית, יצליחו יזמים כגון מוסק וביגלו לדחוף את תעשיית החלל הפרטית להישגים נכבדים יותר ויותר. הטיסות למאדים יחלו תוך עשור או שניים, ומושבה קבועה שם תקום אולי תוך עשור נוסף. אחדים מהמבוגרים כיום יזכו לראות את הקמת המושבה, שצפויה לגדול בהדרגה עד לממדי יישוב קטן. תושבי מאדים יצטרכו להצטייד בבלוני חמצן לפני היציאה מהמושבה: זאת משום שהאטמוספרה של כוכב הלכת דלילה ביותר, והלחץ על פני הקרקע הוא אחוז אחד בלבד מהלחץ שקיים על פני הים בכדור הארץ. כוח הכבידה על מאדים הוא רק 38% מזה של כדור הארץ, ואין שם מים במצב צבירה נוזלי. רק אם המושבה תקום באזור המשווה של מאדים, סביר שהטמפרטורה החיצונית תהיה נסבלת עבור בני אדם. בשאר המקומות על מאדים רוב השנה קר מאוד וחלק מהאטמוספרה קופאת. בתנאים הנוכחיים של מאדים, ללא הגנה מיוחדת רק חזזיות ובקטריות יכולות לשרוד.

כאשר מספר תושבי מאדים יגדל לכמה אלפים, סביר שתבוא דרישה להתאים את כוכב הלכת למגורי אדם ללא צורך בחמצן ובחליפות חלל. משימה זו, המכונה terraforming, תחייב משאבים עצומים שבצידם שכר גדול. יש להעלות את צפיפות האטמוספרה ואת ריכוז החמצן החופשי בה, ובמקביל לחמם את פני השטח מעל לטמפרטורה ממוצעת של 63 מעלות מתחת לאפס. ייתכן שניתן להשיג את שתי המטרות בו־זמנית, על־ידי הסטת מספר כוכבי שביט ממסלוליהם כדי לגרום להם להתנגש במאדים.

כוכב שביט טיפוסי הוא גוף בקוטר של כ־10 ק"מ, שמורכב בעיקר מקרח של מים וגזים קפואים אחרים, מעורבב עם גושי סלע בגדלים שונים. גוף כזה מכיל כ־20 מיליוני מיליונים (2 כפול 10 בחזקת 13) טונות של חומר, וכשהוא עומד להתנגש בכוכב לכת מהירותו היא בסדר גודל של 10 ק"מ לשנייה. אנרגיית ההתנגשות



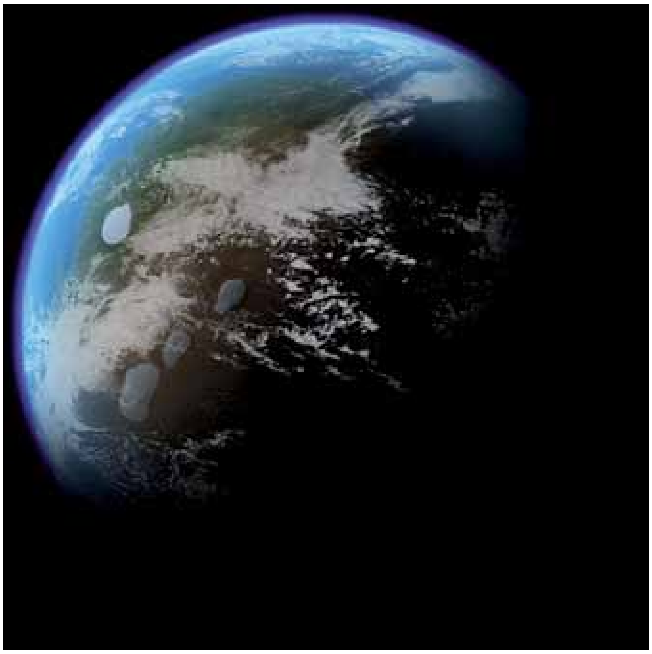
תמונה מס׳ 6: הפנים של חללית דראגון, כפי שהוצג בפני העיתונות, יהיה מרווח מספיק כדי להכיל שבעה אסטרונאוטים. צילום: ספייס X.



תמונה מס׳ 7: צינור לבה בפארק הרי הגעש הלאומי האמריקאי שנמצא בהוואי. מבנים דומים זוהו במאדים, ובעתיד ניתן יהיה להקים בהם מושבה על מאדים. צילום: Frank Schulenburg

הופכת כולה לחום, שעשוי לחמם במקצת את הקליפה העליונה של מאדים. השפעה משמעותית יותר תהיה לשחרור חומר השביט לתוך האטמוספרה של מאדים. במצב כזה האטמוספרה תהפוך בן־רגע לצפופה יותר ועשירה יותר בחומרים כגון אמוניה, מתאן ופחמן דו־חמצני. חומרים אלה ידועים כגורמים ל"אפקט חממה" – כלומר, ללכידת הקרינה התת־אדומה, שלא תצליח, לפיכך, לקרר חזרה את מאדים. הטמפרטורה הממוצעת במאדים צפויה, אם כן, לעלות, ובשלב ראשון כיפות הקרח המכיל פחמן דו־חמצני יתאיידו – תהליך שיגביר עוד יותר את אפקט החממה. כיפות הקרח צפויות גם לשחרר, אגב התאיידות, כמות נכבדה מאוד של מים, שבאופן תיאורטי אמורים להספיק כדי ליצור אוקיינוס בעומק 11 מ׳ על כל השטח של מאדים. ההערכה היא כי אוקיינוס כזה לא יציף את פני הקרקע של הכוכב כולו עקב הבדלי הגובה. מצד שני, סביר שבשלב זה יופיעו אוקיינוסים רדודים של מים ואטמוספרה צפופה עוד יותר.

עם העלייה בטמפרטורה והוספת חומר לאטמוספרה ניתן יהיה להביא לכוכב גם צמחים מכדור הארץ. אלה ישחררו חמצן חופשי, כך שתוך תקופה לא ארוכה במיוחד, כמה מאות שנים, ניתן יהיה להסתובב במאדים ללא חליפות הגנה או בלוני חמצן. ומה הלאה? להיכן ישאף המין האנושי להגיע? יש החושבים על הירחים הגדולים של צדק כמקום מתאים להתיישבות, ויש הרוצים ללכת הלאה ולהגיע אל הכוכבים שנמצאים במרחק שנות אור מאיתנו. הדרך לשם ארוכה לפחות כמו זו הנדרשת כדי להתאים את מאדים להתיישבות אנושית. אך מי יודע, אולי שתי המטרות יקודמו במקביל.



תמונה מס׳ 8: מאדים, לאחר השלמת הצעדים הנדרשים כדי להתאימו למגורי אדם. איור: האמן Daein Ballard

על הגיאומטריה, הפרספקטיבה והעולם שאנו רואים

בבית־הספר סיפרו לנו כי שני ישרים מקבילים לא ייפגשו לעולם, אבל זה רק בגלל שלא למדנו גיאומטריה פרויקטיבית. ד"ר טל הסנר מסביר כיצד התחום המתמטי הייחודי הזה משמש אותנו לפיתוח ראייה ממוחשבת, שמאפשרת לנתח את עבודת המצלמה ואפילו להחזיר לחיים יצירות אמנות מתקופת הרנסנס

בערך בשנת 300 לפנה"ס פרסם אוקלידס את שלושה־עשר כרכי ספרו "היסודות", ובכל קנה מידה זו הייתה הצלחה מסחררת. אמנם, מרבית המידע שנכלל בספר היה ידוע עוד קודם, אך הוא הציע טיפול שיטתי ומסודר בגיאומטריה ("גיאו" – אדמה, "מטריה" – מדידה), שהעניק למהנדסים דרכים מדויקות לתכנן מכונות, לאדריכלים – אמצעים לחשב מידות, ולמתמטיקאים – שיטות משכנעות להוכיח טענות.

ההצלחה של "היסודות" הייתה כה כבירה, עד כי במהלך אלפיים השנים העוקבות היה המושג "גיאומטריה" שם נרדף ל "גיאומטריה אוקלידית". העולם המדעי לא הכיר גיאומטריה אחרת זולת זו שתוארה ב"היסודות". מפתיע אולי לגלות, אם כן, שחרף אותה הצלחה הגיאומטריה האוקלידית הייתה לקויה: היו מקומות אליהם היא פשוט לא יכולה הייתה להגיע, ושאלות עליהן היא לא יכלה לענות.

כולנו מכירים דוגמה אחת לחור שכזה במערכת הכללים וההגדרות של אוקלידס עוד מימינו בבית־הספר היסודי: ברור כי שני קווים ישרים (שונים) נחתכים בנקודה אחת. אם כן, באיזו נקודה נחתכים שני ישרים מקבילים? התשובה שלמדנו בבית־הספר היסודי היא, פשוט, "הם לא". אם נתעקש ונדרוש תשובה בכל זאת, המורה למתמטיקה יזוז באי־נוחות ויאמר, אולי, "הם נפגשים באינסוף". הבעייתיות בכך מתגלה כאשר מנסים לחשב את מיקום אותה נקודת מפגש באופן אלגברי, תוך שימוש במשוואת הקו הישר:

$$ax + b = y$$

לשני ישרים מקבילים יהיה אותו ערך a (אותו שיפוע), ומכאן, ניסיון למצוא ערכים ל־x ול־y שיקיימו את המשוואות של שני ישרים מקבילים, יוביל לסתירה.

למרות הבעייתיות האלגברית הברורה, שתי התשובות אינן ממש משכנעות: הגדרנו כאן בקלות מצב שבו לשאלה גיאומטרית פשוטה אין תשובה במסגרת כללי הגיאומטריה המוכרת; הנקודה שבה שני ישרים שונים ומקבילים נפגשים איננה נמצאת בתחומי



פליס וריני (Felice Varini), עבודה על גג מבנה. מתוך הפתיחה של הביאנלה לאמנות – Estuaire 2007 / על העבודה והאמן ראה עמוד 53
Photo by Alain DENANTES / Gamma - Rapho via Getty Images

הגיאומטריה האוקלידית. לכאורה, זוהי בעיה קטנונית – הרי מדוע בכלל מעניין אותנו מקום המפגש של ישרים מקבילים? ומה הפגם בתשובה "אינסוף"? בפועל, כפי שגילו ציירי הרנסנס, לשאלה זו יש חשיבות רבה.

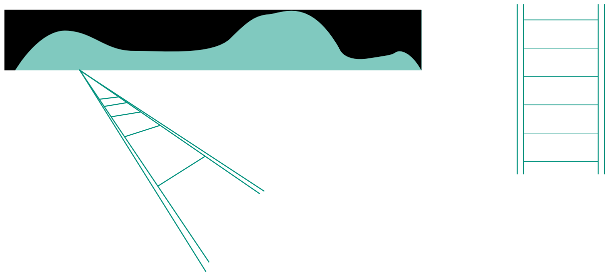
הרנסנס והפרספקטיבה

בתקופת הרנסנס הייתה תחייה של העיסוק במחקר ובאמנות. לאחר מאות שנים של איסורים דתיים והבורות שהתלוותה אליהם, החלו אמנים שוב להתעניין באפשרות "ללכוד" את המציאות בציוריהם. על מנת לשקף באופן מציאותי את העולם בציור, אחד האתגרים שעמדו בפניהם היה יצירת אשליה משכנעת של עומק בתמונה. כאן החלו אמנים כגון ברונלצ'י (Filippo Brunelleschi, 1377־1446), אלברטי (Leon Battista Alberti, 1404־1472) ורבים אחרים לחקור באופן שיטתי את הקשר שבין המרחק של חפץ כלשהו בעולם מעינו של הצייר, לבין גודל הדימוי שלו בציור.

אמנם, אמני הרנסנס בהחלט לא היו הראשונים שעסקו בשאלות אלה, ואפילו אוקלידס דן בהן בספרו "אופטיקה", אך החידוש כאן היה החיפוש אחר יסודות שיטתיים שבהם ניתן להשתמש, על מנת לשחזר במדויק את תחושת הצפייה בעומק.

חיפוש זה הוביל לחקר הפרספקטיבה. הכלל הראשון בפרספקטיבה מוכר לכולנו. אם נרצה ליצור תמונה שמדמה את המציאות באופן משכנע, עלינו להקפיד על הכלל הפשוט (לכאורה): "מה שיותר קרוב יותר גדול". השאלה, אם כן, היא, עד כמה בדיוק יותר גדול המשהו הזה צריך להיות? איך נחשֵב לכל עצם את הגודל המתאים לו, על מנת שהתמונה כולה תיצור אשליית עומק משכנעת?

קחו, לדוגמה, את השרטוט של פסי הרכבת באיור 1 (ימין). בתמונה אנו רואים את הפסים באופן מעט לא שגרתי – במבט מלמעלה למטה. בהנחה כי פסי הרכבת הם שני ישרים מקבילים אשר נמצאים על מישור, הנקודה שבה שני פסי המסילה נפגשים נמצאת, על־פי אוקלידס, באינסוף (וכאשר מדברים על פסי רכבת, טוב שכך!). עם >>



איור 1, מימין: שרטוט של פסי רכבת כפי שהם נראים מזווית ראייה עליונה, הפונה ישירות כלפי הרצפה – ללא פרספקטיבה. משמאל: נקודת מבט פרספקטיבית, שבה פסי הרכבת מצטלבים בנקודת מגוז על קו האופק.

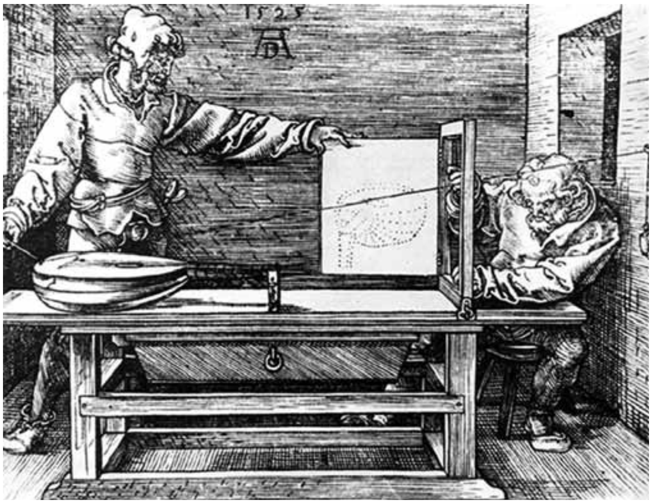
>> זאת, כפי שציינו קודם, לעתים רחוקות בלבד אנו רואים פסי רכבת מזווית צפייה שכזו. לרוב, אנו רואים אותם כפי שהם מופיעים בצד שמאל של האיור – בפרספקטיבה. כאן, ככל שפסי הרכבת רחוקים יותר מהצופה, אורך השלבים שביניהם קצר יותר, והפסים עצמם הולכים וקרבים זה לזה עד להצטלבותם בנקודה.

הנקודה שבה מתמזגים פסי הרכבת באיור היא כה חשובה, עד כי זכתה בשם משלה: "נקודת מגוז" (vanishing point), והיא נמצאת על ישר חשוב – קו האופק. החשיבות של נקודת המגוז נובעת מהיותה הנקודה בציור שבה מתלכדים כל הישרים המקבילים זה לזה, בדיוק כמו במקרה של זוג פסי הרכבת באיור שלעיל. אם במקום שני פסי רכבת מקבילים היו לנו מאה, כולם היו מצטלבים באותה נקודת מגוז. זאת, מאחר שקו האופק הוא ישר שבו כל נקודה היא נקודת המגוז של אוסף ישרים מקבילים אחר. באיור 1, השלבים שבין פסי הרכבת גם הם מקבילים. אם נמשיך את ציורם באיור השמאלי, הם יצטלבו בנקודת מגוז משלהם, שתהיה גם היא על אותו קו אופק.

שאלה למחשבה (פתרון באיור 6, בסוף המאמר)**: כיצד ניתן, בעקבות הפיסקה האחרונה, לחשב את הרווח ההולך וקטן בין השלבים השונים באיור, על מנת ליצור אשליה משכנעת של עומק?**

חישבו על כל נקודה בתמונה כעל מיקום אותו ניתן לתאר באמצעות שני מספרים – שתי קואורדינטות – (x,y): את מרחק הנקודה מהדופן העליונה של התמונה (נניח בסנטימטרים) נסמן ב־y, ואילו המרחק מהדופן השמאלית של התמונה יסומן ב־x. אין דבר המייחד את הקואורדינטות של נקודת המגוז בהשוואה לנקודות שמעליה או לצידיה בתמונה. בכל זאת, דבר אחד חשוב אפשר לומר עליה: בנקודת המגוז אנו רואים את המקום שבו שני פסי הרכבת נפגשים – זוהי, אם כן, תמונה של נקודה באינסוף, נקודה שהגיאומטריה האוקלידית מלמדת אותנו כי היא איננה קיימת!

גילוי זה מחזיר אותנו לאותה בעיה קטנונית בגיאומטריה האוקלידית. על מנת ליצור אשליית עומק, יש למצוא דרך שיטתית להעתיק את המישור שעליו מונחים פסי הרכבת המקבילים (הרצפה) אל מישור התמונה, תוך עיוות התמונה לשם יצירת אשליה פרספקטיבית. העתקה זו נדרשת, כפי שראינו, לטפל גם בנקודות שאינן בתחום הגיאומטריה האוקלידית, הנקודות שבהן נפגשים ישרים מקבילים, ולהעתיק אותן לנקודות המגוז שבתמונה. קל לראות כיצד צצה מייד השאלה: איך מעתיקים נקודה שאיננה קיימת אל נקודה המתוארת על־ידי קואורדינטות ככל הקואורדינטות בתמונה?



איור 2, תחריט: מכשיר פרספקטיבה פרי פיתוחו של הצייר אלברכט דירר (ALBRECHT DURER), 1525. המכשיר שימש ככלי הדרכה ליצירת ציורים בעלי פרספקטיבה נכונה.

מבחינה מעשית, אמני הרנסנס פתרו את הבעיה בכך שייצרו מכשירי פרספקטיבה, כמו זה המופיע בתחריט שלהלן (איור 2), או באמצעות שיטות ציור, כגון זו המתוארת באיור 6 בסוף המאמר. כלים מעין אלה אפשרו לציירים לבנות אשליות פרספקטיביות מדויקות להפליא, אך השאירו מאחור את הגיאומטריה האוקלידית, שלא יכלה לספק כלים מתמטיים לביצוע אותן פעולות.

שאלות חדשות, גיאומטריה חדשה

הגיאומטריה האוקלידית שימושית להצגה ולפתרון של שאלות, כגון "לאילו אובייקטים יש אותה צורה?", באמצעות הטיפול שהיא מציעה לזוויות ולמרחקים. עם זאת, זוויות ומרחקים אינם שומרים על מידותיהם כאשר "מצלמים" תמונה; הזוויות שבין שני

פסי הרכבת השתנו כאשר עברנו ממישור הרצפה למישור התמונה, ואיתן גם השתנו המרחקים שבין הפסים.

שאלות כדוגמת "האם אלה הן שתי תמונות של אותו חפץ?", שהעסיקו מאז ומעולם אמנים, מעסיקות כיום גם חוקרים בראייה ממוחשבת. ראייה ממוחשבת היא ענף מרכזי במדעי המחשב, המתמקד בפיתוח שיטות לניתוח תמונות וסרטי וידיאו דיגיטליים, במטרה להבין מה משתקף בעולם המצולם בהם. הניתוח הזה דומה לאופן שבו המוח שלנו מבין את העולם אותו רואות עינינו.

השימושים הרבים שיש לתוכנות המבינות תמונות, מספקים מוטיבציה כלכלית למחקר ופיתוח בתחום. מוטיבציה נוספת נובעת מהרצון להבין טוב יותר כיצד פועל המוח שלנו, על־ידי שחזור האופן שבו הוא מבצע פעולות בסיסיות, כגון ראייה.

על מנת לספק תשובה לשאלה שלעיל, עלינו להגדיר תחילה באופן מתמטי את ההעתקות שתיארנו קודם – ממישור למישור (רצפה לתמונה) או מהעולם הפיזיקלי התלת־ממדי להשתקפות שלו בתמונה דו־ממדית. כאן בדיוק נכנסת לתמונה (גם ליטרלית) הגיאומטריה הפרויקטיבית (projective מלשון "הטלה", מילה המשמשת לתיאור המיפוי ממרחב למרחב, למשל מתלת־ממד לדו־ממד). זוהי גיאומטריה יפהפייה ששורשיה, כפי שאפשר כבר להבין, נעוצים באמנות הרנסנס, ואשר מספקת גם כיום כלים חשובים למחקר ולפיתוח שיטות ממוחשבות מתקדמות.

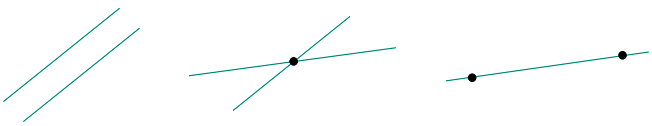
אבל היא בהחלט אינה הדיסציפלינה היחידה עליה נסמכים חוקרי ראייה ממוחשבת. מחקר בתחום מחייב למידה ושימוש בכלים ובשיטות ממגוון רחב מאוד של תחומי דעת, כגון פסיכולוגיה ואמנות, מתמטיקה ותכנות, אלגברה וגיאומטריה.

המשפט הראשון אותו ניתן לשייך לגיאומטריה הפרויקטיבית הוא משפט פפוס (שהוכח בסביבות שנת 300 לספירה על־ידי פפוס מאלכסנדריה), עליו לא נתעכב כאן. הבאים אחריו שחקרו תכונות של פרספקטיבה, היו מתמטיקאים בתקופת הרנסנס. קפלר (Johannes Kepler, 1571-1630) ודזארג (Gérard Desargues, 1591-1661) גילו, כל אחד באופן עצמאי, את הנקודה באינסוף. דזארג אף הרחיב ותיאר כיצד ניתן לנצל אותה על מנת ליצור אשליית פרספקטיבה בתמונות. עם השנים, מתמטיקאים רבים עסקו ב"חור" של הגיאומטריה האוקלידית בכל מה שקשור לפרספקטיבה, אך רק במאה התשע־עשרה זכתה הגיאומטריה הפרויקטיבית להיוולד כגיאומטריה חלופית לזו של אוקלידס, כאשר מתמטיקאים מהעת החדשה, כגון פונסלה (Jean-Victor Poncelet, 1788-1867) וג'רגון (Joseph Gergonne, 1771-1859), החלו לעסוק בה.

בבסיס הגיאומטריה הפרויקטיבית מוצעת דרך חלופית לייצוג ישויות גיאומטריות, כגון נקודות וישרים. במסגרת המופיעה המלווה את המאמר אתאר על קצה המזלג את הייצוג הזה. כאן אתמקד במשמעותו.

ראשית, אחזור לרגע לגיאומטריה של אוקלידס. ב"היסודות" הציג אוקלידס את התורה שלו באמצעות אקסיומות – הנחות בסיסיות שאינן דורשות הוכחה ומהוות את היסוד לגיאומטריה, ולצידן כללים המאפשרים להסיק מסקנות מאותן הנחות, שיוכיחו או יפריכו טענות שונות שאינן מופיעות בהנחות עצמן. היופי שבגיאומטריה האוקלידית נבע, בין היתר, מהיותה עקבית: לא ניתן באמצעות האקסיומות ואותם כללים להוכיח דבר והיפוכו גם יחד. האקסיומה הראשונה שהציג אוקלידס הייתה ההנחה הבאה: **"דרך כל שתי נקודות אפשר להעביר קו ישר אחד, ורק אחד".**

אם נשנה את האקסיומה של אוקלידס רק במעט – נחליף "נקודה" ב"קו ישר" וההפך – נקבל את הטענה הדואלית לאקסיומה הראשונה: **"כל שני קווים ישרים מצטלבים בנקודה אחת".**



איור 3, מימין: ההנחה הראשונה של אוקלידס – "בין כל שתי נקודות עובר קו ישר אחד". באמצע: הטענה הדואלית כי בין כל שני ישרים נמצאת נקודה אחת, איננה נכונה בגיאומטריה האוקלידית, כפי שניתן לראות משמאל, במקרה של ישרים מקבילים.

איור 3 ממחיש טענה חדשה זאת. הטענה נראית דומה לאקסיומה הראשונה, ואמנם קל לראות מדוע היא נכונה במקרים רבים, אך למרות זאת היא איננה נכונה תמיד – מה קורה כאשר שני הישרים מקבילים? הייצוג החלופי שמציעה הגיאומטריה הפרויקטיבית לנקודות וקווים מאפשר לטפל בנקודות וישרים במישור באותם כלים ובאותם אופנים, ללא הבדל. זהו ביטוי לאחת התכונות היפות בגיאומטריה הפרויקטיבית – "עקרון הדואליות". באופן כללי, ניתן "להפוך" משפטים, כפי שעשינו למעלה – מנקודות לישרים וההפך, ולקבל משפטים חדשים שיהיו נכונים ובני הוכחה במסגרת הגיאומטריה הפרויקטיבית (אך, כאמור, לא בגיאומטריה האוקלידית), וזאת, למרבה ההפתעה, מבלי לוותר על עקביות התורה: גם הגיאומטריה הפרויקטיבית איננה מאפשרת להוכיח ולהפריך את אותה טענה. הסימטריה הזאת היא אחד המאפיינים המיוחדים לגיאומטריה הפרויקטיבית אשר, כפי שניתן ללמוד מהגיאומטריה האוקלידית, אינו מובן מאליו.

אז איך כל זה עוזר לנו? ראשית, כפי שהראינו, בגיאומטריה הפרויקטיבית אפשר להוכיח משפטים חדשים שאינם נכונים בגיאומטריה האוקלידית, ושבינם לבין עצמם יוצרים סימטריה מפתיעה. שנית, האפשרות לטפל בנקודות כפי שניתן לטפל בישרים

>>

הנוסחאות מאחורי הפרספקטיבה

למעוניינים ולמתעניינים, הנה הסבר מתמטי על קצה המזלג לגיאומטריה הפרויקטיבית

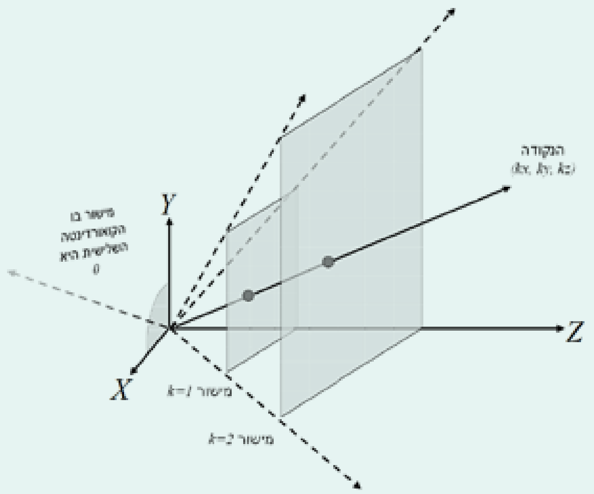
ניתן לתאר את הגיאומטריה הפרויקטיבית בדרכים שונות. כאן אנסה לעשות זאת באמצעות "קואורדינטות הומוגניות", המאפשרות להציג את הרעיונות המרכזיים בגיאומטריה זו באמצעות כלים מהגיאומטריה האוקלידית, ועל הדרך לנצל פעולות אלגבריות מוכרות לחישובים שאינם אפשריים בגיאומטריה של אוקלידס.

אם נתמקד בנקודות בדו־ממד – כלומר, במישור – קואורדינטות הומוגניות הן, לכאורה, תוספת פשוטה של קואורדינטה אחת לייצוג נקודות במישור: במקום לתאר נקודה בתמונה על־ידי הזוג (x,y), כפי שנהוג לעשות בגיאומטריה אוקלידית וכפי שעשינו אנו עד כה, תירשם אותה נקודה בקואורדינטות הומוגניות באמצעות שלושה מספרים (x,y,1). לשינוי הזה יש חשיבות מעבר לתוספת של המספר 1 לייצוג המיקום: בקואורדינטות הומוגניות מתייחסים לכל נקודה מהצורה (kx,ky,kz), עבור כל מכפלה בערך k כלשהו השונה מאפס, כייצוג חלופי שקול לנקודה המקורית (x,y). לכן, אם תינתן לנו נקודה בייצוג הומוגני שבה הערך השלישי שונה מ־1, על מנת לקבל את מיקומה בקואורדינטות אוקלידיות עלינו לחלק, קודם־כול, את שתי הקואורדינטות הראשונות שלה בשלישית. למשל, הנקודות בקואורדינטות הומוגניות (3,2,1) ו־(6,4,2) מתייחסות לאותה נקודה במישור, שהיא הנקודה בתמונה בעלת הקואורדינטות הרגילות (3,2).

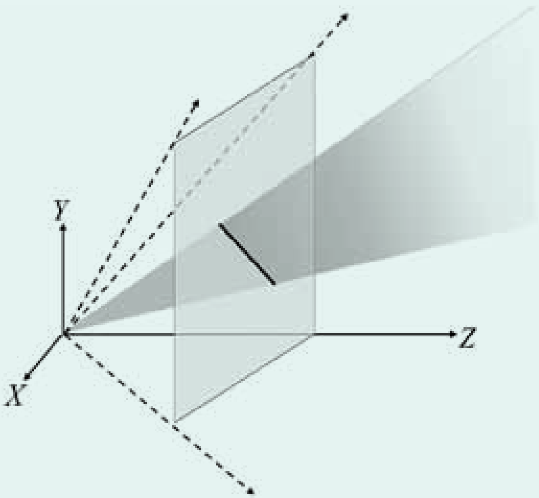
ניתן להמחיש ייצוג זה באופן הבא (ראו גם איור 7). אם עד כה הייתה לנו נקודה במישור, בקואורדינטות הומוגניות אנו מתייחסים לאותה נקודה כקרן (קו ישר היוצא מראשית הצירים) החותכת מישורי תמונה רבים. החיתוך שלה עם מישור תמונה כזה או אחר נקבע על־ידי מכפלת השלשה (x,y,1) בקבוע k מתאים.

אם נקודה בתמונה המקורית מיוצגת על־ידי קואורדינטות הומוגניות כקו ישר היוצא מהראשית, כיצד מיוצג קטע ישר בתמונה? זהו אוסף כל הקרניים שעוברות דרך הישר המקורי בתמונה (איור 8). אלה יוצרות מישור המוגדר על־ידי ראשית הצירים ושתיים מהנקודות בישר שבתמונה.

אחד הרעיונות המרכזיים והיפים בגיאומטריה הפרויקטיבית הוא עקרון הדואליות, ובו ניתן להיעזר על מנת לברוח מתחומי הגיאומטריה האוקלידית.



איור 7: נקודות בייצוג הומוגני הן קרניים היוצאות מראשית הצירים.



איור 8: ישר בתמונה מיוצג בקואורדינטות הומוגניות כמישור. זהו מישור המוגדר על־ידי ראשית הצירים ושתי נקודות בישר שבתמונה.

כפי שראינו, נקודות בתמונה מתוארות על־ידי שלושה מספרים הנקראים קואורדינטות הומוגניות. אולי מפתיע לגלות, כי גם ישרים בתמונה מתוארים באותו אופן – על־ידי שלושה מספרים, (a,b,c), כאשר גם כאן אין מבדילים בין מכפלות של אותה שלישייה בקבוע כלשהו k השונה מאפס: (a,b,c) ו־(ka ,kb, k) הם ייצוגים חלופיים, שקולים, בקואורדינטות הומוגניות לאותו קו ישר בתמונה.

הייצוג הן של נקודות והן של ישרים כשלשות מאפשר לנו להחליף ביניהן בחישובים שונים. כדוגמה, ניקח את הפעולה הבסיסית הבאה באלגברה – המכפלה הווקטורית (cross product) המסומנת באמצעות X (מיד נראה כי הבחירה בסימון זה איננה מקרית). מכפלה וקטורית של שתי שלשות של קואורדינטות היא בעצמה שלשה, המוגדרת באופן הבא:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1z_1 - z_1y_2 \\ z_1x_2 - x_1z_2 \\ x_1y_2 - y_1x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix}$$

לא נראה זאת כאן, אך אם (x1,y1,z1) הוא הייצוג של נקודה אחת ו־(x2,y2,z2) הוא הייצוג של נקודה שנייה, אזי תוצאת הביטוי שלמעלה, השלשה (a,b,c), היא תיאור הישר העובר בין שתי הנקודות. עד כה אין כאן שום חידוש. למעשה, זהו ביטוי לאקסיומה הראשונה של אוקלידס: בין שתי נקודות עובר קו ישר. כאן רק מצאנו אותו באמצעות המכפלה הווקטורית, ולא באמצעות משוואת הישר המוכרת. אבל מה קורה אם נחשב את המכפלה הווקטורית של שני ישרים במקום שתי נקודות?

כאמור, ישרים ונקודות מיוצגים בקואורדינטות הומוגניות באותו אופן בדיוק – כשלשות של מספרים. לכן, אין שום מניעה לחשב את המכפלה הווקטורית של שני ישרים. אדלג על פרטי ההוכחה ואציין, כי תוצאת הביטוי תהיה נקודת ההצטלבות של שני הישרים בייצוג הומוגני (ומכאן הבחירה הברורה בסימן X).

מה תהיה הנקודה שתתקבל ממכפלה ווקטורית של שני ישרים מקבילים? כפי שציינתי, בנוסחה של המכפלה הווקטורית, להבדיל מהשימוש במשוואת הישר בגיאומטריה אוקלידית, אין כל קושי לחשב את המיקום שבו שני ישרים מצטלבים, גם אם הם מקבילים. נדלג כאן שוב על הפרטים הטכניים ונציין, שבמקרים אלה התוצאה תהיה שלשה של קואורדינטות ככל השלשות, עם הבדל אחד מהותי: היא תהיה מהצורה (x,y,0).

זאת בוודאי לא נקודה בתמונה, מכיוון שלא ניתן לחלק את שני הערכים הראשונים בערך השלישי. אבל זו נקודה בכל זאת – נקודה הקיימת בגיאומטריה הפרויקטיבית אך לא בגיאומטריה האוקלידית! הייצוג ההומוגני, אם כך, "מפנה מקום בצד" עבור נקודות שאינן נקודות בתמונה, נקודות המייצגות את הכיוון שבו נפגשים שני ישרים מקבילים, ולא את המיקום המדויק. נקודות אלה, הנקראות גם נקודות "אידיאליות", נמצאות על המישור שבו הקואורדינטה השלישית היא אפס (ראו שוב איור 7). חשיבות ייצוג זה נובעת מכך, שבאמצעותו אנו יכולים לתאר את אותן נקודות בעייתיות, הנקודות באינסוף, באופן המאפשר לנו להתייחס אליהן כאילו הן נקודות "רגילות" לכל דבר.

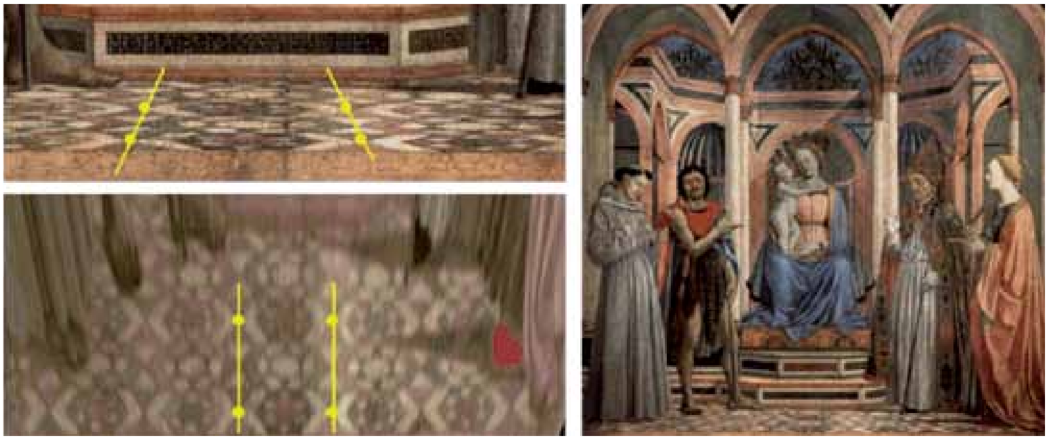
שימו לב כי קיבלנו שעל־פי עקרון הדואליות והגיאומטריה הפרויקטיבית, מכפלה וקטורית של שתי נקודות היא ישר – הישר העובר ביניהן – ומצד שני, המכפלה הווקטורית של שני ישרים היא נקודה – הנקודה בה שני הישרים מצטלבים. מלבד סימטריה יפה בין נקודות לישרים, עקרון הדואליות מאפשר לנו לצאת לראשונה מגבולות הגיאומטריה האוקלידית: אמנם אוקלידס ידע כי בין כל שתי נקודות עובר ישר, אך הצד השני בעקרון הדואליות לא קיים בגיאומטריה שלו: אצלו, כאמור, שני ישרים לא בהכרח נפגשים.

כעת, משאנו יודעים כי "אין נקודות אסורות", וניתן לתאר גם נקודות באינסוף באופן אלגברי פשוט ועקבי, נפנה להעתקות עצמן. הגיאומטריה הפרויקטיבית והקואורדינטות ההומוגניות מספקות אמצעי פשוט לתיאור העתקות פרספקטיביות ממישור למישור (וגם כאן לא אלאה אתכם בהסברים): אם הקואורדינטות ההומוגניות (x,y,z) מייצגות נקודה במישור אחד – למשל, נקודה על פסי הרכבת שעל הרצפה – נוכל לקבוע היכן נראה את אותה נקודה במישור התמונה על־ידי חישוב מהצורה הבאה:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} \qquad \begin{bmatrix} ax + by + cz \\ dx + ey + fz \\ gx + hy + iz \end{bmatrix}$$

הקואורדינטות (x′,y′,z′) מייצגות כאן את מיקומה של אותה נקודה בתמונה בקואורדינטות הומוגניות. הערכים a,..,i מגדירים את ההעתקה עצמה – בחירות שונות של ערכים אלה ייצרו העתקות שונות ממישור למישור (מהרצפה לתמונה פרספקטיבית כלשהי, או מתמונה אחת לאחרת).

אם לנקודה (x′,y′,z′) שקיבלנו ישנו ערך z′ השונה מאפס, זו נקודה "רגילה" בתמונה ונוכל לקבל את מיקומה על־ידי חלוקת שתי הקואורדינטות הראשונות שלה ב־z′. אם במקרה z′=0, קיבלנו העתקה של נקודה "רגילה" לנקודה באינסוף, נקודה שאינה נמצאת בתמונה. כך או כך, הפעולה שהגדרנו אינה מצריכה טיפול מיוחד כלשהו באותן נקודות בעייתיות באינסוף.



איור 4, מימין: הציור של ונציאנו, "המזבח של סנטה לוצ'יה". משמאל למעלה: תקריב של השטיח, ועליו שני קווים ישרים שסימנו באופן ידני. אלה הם שני קווים שאנו יודעים כי במציאות, ללא העיוות הפרספקטיבי, אמורים להיות מקבילים. אם נמשיך אותם כלפי מעלה בתמונה, נוכל למצוא את נקודת המגוז, מאחורי הכיסא במרכז התמונה. בצד שמאל למטה ניתן לראות את אותם ישרים, לאחר ביטול הפרספקטיבה. כאן מצאנו, באופן ממוחשב ואוטומטי, איזו העתקה תעתיק את הישרים שבתמונה הפרספקטיבית למעלה לישרים המקבילים שלמטה. בשלב הבא ניתן להפעיל את ההעתקה שנמצאה על שאר התמונה, ולקבל מבט על, נטול עיוותים פרספקטיביים, של השטיח שבחדר.

<< סוללת גם "דרך עוקפת אינסוף": בגיאומטריה הפרויקטיבית ניתן להעתיק מישור למישור (תמונה לתמונה, רצפה לתמונה וכו'), מבלי לחשוש ממקרים בהם נקודות רגילות יישלחו לאינסוף (למשל, אם נוריד את המבט מהאופק ונסתכל על הרצפה באיור 1 משמאל לימין), או ממקרים בהם נקודות באינסוף יועתקו לאמצע התמונה (איור 1, מימין לשמאל). על מנת להדגים זאת, התבוננו בציור של אמן הרנסנס ונציאנו (Domenico Veneziano, 1410־1461), המופיע באיור 4. שאלה שהטרידה חוקרי אמנות הייתה, כיצד נראה השטיח עליו עומדות הדמויות בציור? לא רק עניין אסתטי בשטיחים עתיקים עמד מאחורי השאלה, אלא ניסיון לברר נקודה מהותית יותר: עד כמה דייק ונציאנו (וכמוהו ציירי רנסנס אחרים) בפרספקטיבה שצייר?

כדי להתבונן בשטיח מנקודת מבט נטולת פרספקטיבה, עלינו למצוא דרך להעתיק את תמונת השטיח – שבה קווים מקבילים נראים כאילו הם נפגשים בנקודת מגוז מאחורי הכיסא שבמרכז התמונה – לתמונה בה קווים אלה נראים מקבילים. במילים אחרות, עלינו למצוא העתקה הלוקחת נקודה בתמונה (נקודת המגוז שמאחורי הכיסא) ומעבירה אותה לנקודה באינסוף (שבה שני הקווים המקבילים נפגשים). העתקה שכזו אפשרית במסגרת הגיאומטריה הפרויקטיבית, אך לא בגיאומטריה האוקלידית. ניתן לחשב העתקה מתאימה באמצעות בחירה של שני ישרים בתמונה, שאנו יודעים כי הם מקבילים במציאות (איור 4, שמאל למעלה). העתקה שתעוות את התמונה כך ששני הישרים שסימנו יהפכו למקבילים, תבטל את הפרספקטיבה ותספק לנו נקודת מבט חדשה על השטיח שבציור.

את התוצאה, שהתקבלה אוטומטית על־ידי מחשב, ניתן לראות בצד שמאל למטה (איור 4). תוצאה זו מרשימה ממספר סיבות. ראשית, היא ממחישה את חשיבות השימוש בגיאומטריה פרויקטיבית בניתוח תמונות: קל בהרבה לזהות ולהבין את תמונת השטיח אחרי שביטלנו את העיוות הפרספקטיבי החריף שבתמונה המקורית. מעבר לכך, תוצאה זו מספקת עדות ברורה למיומנות ולשליטה של ונציאנו (וכאמור, גם אמני רנסנס אחרים) בציור פרספקטיבי: ללא כלים מדויקים יצר ונציאנו ציור שנראה כמו ערב־רב של צבעים. הפעלת שיטות ממוחשבות מודרניות מאפשרת לראות בבירור את ההדפס המקורי בחדר אותו צייר.

להחזיר את העבר לחיים

מגוון השימושים שמאפשר התהליך שתיארנו זה עתה, אינו מוגבל, כמובן, להערכת שטיחים מתקופת הרנסנס. התמונות שאנו מצלמים במצלמות הדיגיטליות שלנו, מציגות עולם מעוות באמצעות פרספקטיבה. מערכות ראייה ממוחשבות המנסות להבין מה מופיע בתמונה, מבטלות את העיוותים הפרספקטיביים באמצעים דומים, כדי להביא את החפצים המופיעים בתמונה למצב "מיושר", שמאפשר להשוות בקלות בין תמונות שונות. כך, הבדלים בין תמונות לא ייגרמו על־ידי עיוותים פרספקטיביים, אלא יהיו תוצאה של שוני בחפצים עצמם; השוואה בין תמונות תתבסס על צורת העצמים המופיעים בהן, ולא תושפע מהזווית ממנה הן צולמו.

שימוש נוסף לגיאומטריה הפרויקטיבית הוצג על־ידי חוקרים במעבדת הראייה הממוחשבת באוקספורד. הם הראו כי אם ניתן למצוא בתמונה רמזים פרספקטיביים, כגון קווים ישרים המתלכדים בנקודות מגוז על קו האופק, אזי ניתן לשחזר את המבנה התלת־ממדי של העולם המופיע בתמונה, ועל־ידי כך לאפשר טיול וירטואלי בחדר המצולם. אותם חוקרים פנו אף הם לציירי הרנסנס במטרה לבחון את השיטות הממוחשבות שפיתחו (או, לחלופין, על מנת לבחון את דיוק הפרספקטיבות בתמונות הרנסנס). דוגמה לציור כזה ניתן למצוא באיור 5 (ימין). אפשר



איור 5, מימין: ציורו של אמן הרנסנס ההולנדי סטינוויק (Henry V Steinwick, 1560–1649), "סנט ג'רום בחדר עבודתו", שבו ניתן לראות רמזים פרספקטיביים רבים. זוהי דוגמה לאחת התמונות ששימשו את החוקרים מאוקספורד, ובאתר שלהם ניתן למצוא סרט המדגים טיול בחדר שבציור. משמאל: שתי דוגמאות לתמונות בהן אין פרספקטיבה – צילומי תקריב של יד אדם ושל דג. לצד כל תמונה, במרכז, מופיעה תוצאת החישוב של המערכת שפיתחתי במסגרת המחקר שלי. המערכת יצרה הערכה לצורתו של האובייקט בתמונה, שהתבססה על ידע קודם על המבנה של אובייקטים דומים.

להתרשם מהתוצאות של עבודת קבוצת החוקרים מאוקספורד בסרטים שיצרו, המאפשרים לצופה בהם "לטייל" במקומות שצוירו לפני מאות שנים, כאילו היו אלה אתרים הקיימים כיום. סרטים אלה זמינים לצפייה באתר האינטרנט של הפרויקט (קישורית לאתר מובאת במסגרת "רוצים לדעת יותר?").

אותה קבוצת חוקרים המשיכה והראתה, כי באמצעים דומים ניתן למדוד את גודלם האמיתי של עצמים המצוירים בתמונות, למרות הפרספקטיבה המעוותת את מידותיהם. מדידות אלה, שבוצעו באמצעות שימוש בגיאומטריה פרויקטיבית, אפשרו לאותם חוקרים לענות, בין היתר, על שאלה מדעית חשובה במיוחד: האם היה, או לא היה, שער של נבחרת אנגליה במשחק מול גרמניה במסגרת אליפות העולם ב־1966 (מי, אם לא חוקרים בריטים, יחקרו פרשה כזו ברצינות ועוד יקדישו מאמר מיוחד לנושא?).

בעבודת מחקר שלי עם פרופ' מיכל אירני ממכון ויצמן מצאנו שימוש מקורי נוסף לגיאומטריה הפרויקטיבית: במקום לעבוד על תמונה אחת שבה רמזים פרספקטיביים, כפי שעשו החוקרים מאוקספורד, השתמשנו במספר תמונות של אותה סצנה מנקודות מבט שונות, אך ללא שימוש ברמזים פרספקטיביים. המערכת שפיתחנו נעזרה בגיאומטריה פרויקטיבית על מנת ליצור תמונה חדשה של אותה סצנה, מנקודת מבט הנמצאת בתוך ההתרחשות עצמה. חישבו על תמונות של משחק כדורגל אשר צולמו מהיציעים. השיטה שפיתחנו מאפשרת לקחת תמונות אלה וליצור באמצעותן תמונה חדשה, הממחישה כיצד נראה היה המשחק אילו צולם מנקודת המבט של הכדור במעופו מעל המגרש.

כמובן, גם הגיאומטריה הפרויקטיבית לא תעזור לנו, אם יש בידינו רק תמונה אחת שאין בה פרספקטיבה ברורה. באיור 5 (משמאל) מוצגות שתי דוגמאות, אשר המשותף להן הוא נקודת הצילום הקרובה, ומכאן – היעדרה של פרספקטיבה. בעבודת מחקר נוספת שערכתי, הפעם עם פרופ' רונן בצרי, גם הוא ממכון ויצמן, פיתחנו שיטות באמצעותן ניתן בכל זאת לחשב את מבנה העצמים בתמונה, גם בתנאים אלה. בדומה לאופן בו, ככל הנראה, המוח שלנו עושה זאת, גם שיטות אלה משתמשות בידע קודם ובניסיון נרכש על מנת להעריך מהו המבנה של החפצים בתמונה, וזאת, כאמור, מבלי להשתמש בפרספקטיבה.

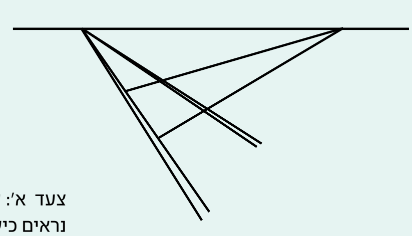
סיכום

במובן מסוים, אוקלידס עשה עבודה טובה מדי: הגיאומטריה שהוא תיאר בספרו "היסודות" הייתה אלגנטית, שימושית, ובעיקר – עקבית. באמצעות הכלים שהוא הציע ניתן להוכיח או להפריך טענות גיאומטריות, אך לא גם וגם בעת ובעונה אחת. תכונות אלה הפכו אותה לפופולרית, אך גם דיכאו את הצורך לחפש גיאומטריות אחרות.

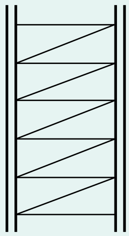
הגיאומטריה הפרויקטיבית, כגיאומטריה חלופית לזו של אוקלידס, הוגדרה באופן פורמלי במאה התשע־עשרה, לצד גיאומטריות חדשות אחרות שנולדו באותה תקופה. אלה, כמו, למשל, הגיאומטריה הכדורית של המתמטיקאי רימן (Bernhard Riemann, 1826־1866), הופיעו כתגובה לצורך בפתרון בעיות, שאיתן הגיאומטריה של אוקלידס לא היטיבה להתמודד. לידתן, לנוכח ההגמוניה רבת השנים של הגיאומטריה האוקלידית, לא הייתה עניין של מה בכך. עד לאותה עת ראו מתמטיקאים והוגים את הגיאומטריה האוקלידית כאידיאל מושלם, אחד ויחיד. הופעתן של גיאומטריות חלופיות, אסתטיות ועקביות לא פחות מזו של אוקלידס, גרמה לסדק ראשון בתפיסה, לפיה יש מתמטיקה אחת שלמה, שבאמצעותה כל טענה ניתנת להוכחה או להפרכה. לימים יהיה זה המתמטיקאי גדל (Kurt Gödel, 1906־1978), שיסתום את הגולל אחת ולתמיד על הרעיון שמערכת מתמטית אחת כזו קיימת.

<<

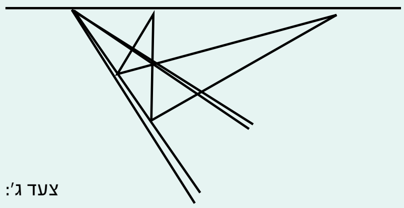
והפתרון לחידה מתחילת המאמר:



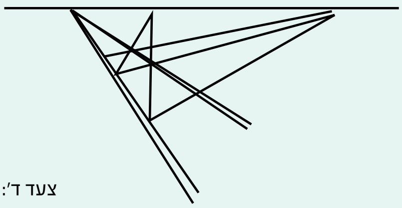
צעד א׳: שני שלבים המקבילים במציאות נראים כישרים המצטלבים בנקודת מגוז על קו האופק.



צעד ב׳: האלכסונים שבין כל שני שלבים גם הם מקבילים אחד לשני.



צעד ג׳: שני אלכסונים של שני תאים שונים בתמונה פרספקטיבית מצטלבים באותה נקודת מגוז על קו האופק.



צעד ד׳: כעת ניתן להוסיף את השלב הבא על־ידי שרטוט ישר מנקודת המגוז של השלבים דרך קצה האלכסון של התא השני.

איור 6: על מנת לצייר את השלבים במרווחים נכונים יש, ראשית, לשים לב לכך, שהאלכסונים בכל תא גם הם אוסף של ישרים המקבילים אלה לאלה, ומכאן, שגם הם יצטלבו כולם בנקודת מגוז על קו האופק. הצעדים המתוארים כאן מסבירים כיצד ניתן לעשות שימוש בהבחנה זאת על מנת לצייר את שלבי הרכבת במקומם הנכון.

רוצים לדעת יותר?

במאמר זה בחרתי להציג את הגיאומטריה הפרויקטיבית כפי שאני הכרתי אותה, וכפי שאני עושה בה כיום שימוש בעבודתי. בדרך השמטתי רעיונות יפים נוספים, והדגש ששמתי על הצדדים היישומיים של הגיאומטריה הפרויקטיבית בא על חשבון אלה המתמטיים התיאורטיים. על מנת להשלים את התמונה אני ממליץ על המקורות הבאים:

מקור נפלא למידע עשיר על ההיסטוריה המרתקת של המתמטיקה, הכולל את תיאור ראשית ימיה של הגיאומטריה הפרויקטיבית, הוא ספרו של פרופ׳ בנו ארבל ״קיצור תולדות המתמטיקה״, בהוצאת מכון מופ״ת. הספר זמין לקריאה מקוונת באתר מכון מופ״ת:

http://www.mofet.macam.ac.il

הגיאומטריה הפרויקטיבית ממלאת תפקיד מרכזי בראייה ממוחשבת. ספר לימוד באנגלית המתמקד בשימושים של הגיאומטריה הפרויקטיבית בראייה כזו, נכתב על־ידי הארטלי וזיסרמן. זהו ספר מקצועי המשמש ללימוד נושאים מתקדמים בגיאומטריה של תמונות ומצלמות.

Richard Hartley, Andrew Zisserman, “Multiple View Geometry in Computer Vision“, 2nd edition, Cambridge University Press

לקבוצת המחקר באוקספורד יש אתר בית, שבו ניתן להתרשם מתוצאות עבודתם על תמונות רנסנס, ובפרט לצפות בסרטים המציגים סיורים בציורי רנסנס. כתובת האתר היא:

http://www.robots.ox.ac.uk/~vgg/projects/SingleView/examples.html

ראו, לדוגמה, את הסרט שנוצר על־ידי עיבוד התמונה שבאיור 5 (ימין) כאן:

http://www.robots.ox.ac.uk/~vgg/projects/SingleView/example_sjerome.html

העבודה של הקבוצה שתיארה את מסקנות החוקרים לגבי משחק הכדורגל גרמניה־אנגליה בשנת 1966, פורסמה במאמר:

Reid I. and Zisserman A., “Goal–Directed Video Metrology“, European Conference on Computer Vision (ECCV) 1996

ולבסוף, עבודותי בנושא שהוזכרו בכתבה הן:

Irani M., Hassner T. and Anandan, P. “What Does the Scene Look Like from a Scene Point?“, European Conference on Computer Vision (ECCV), 2002

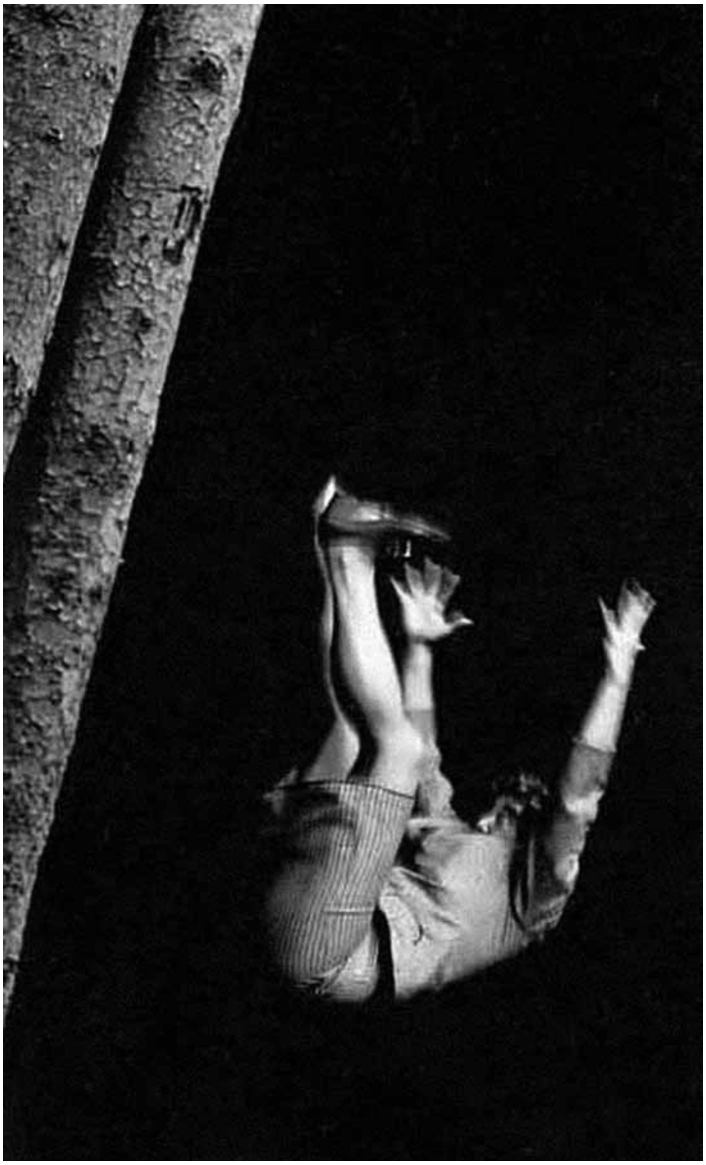
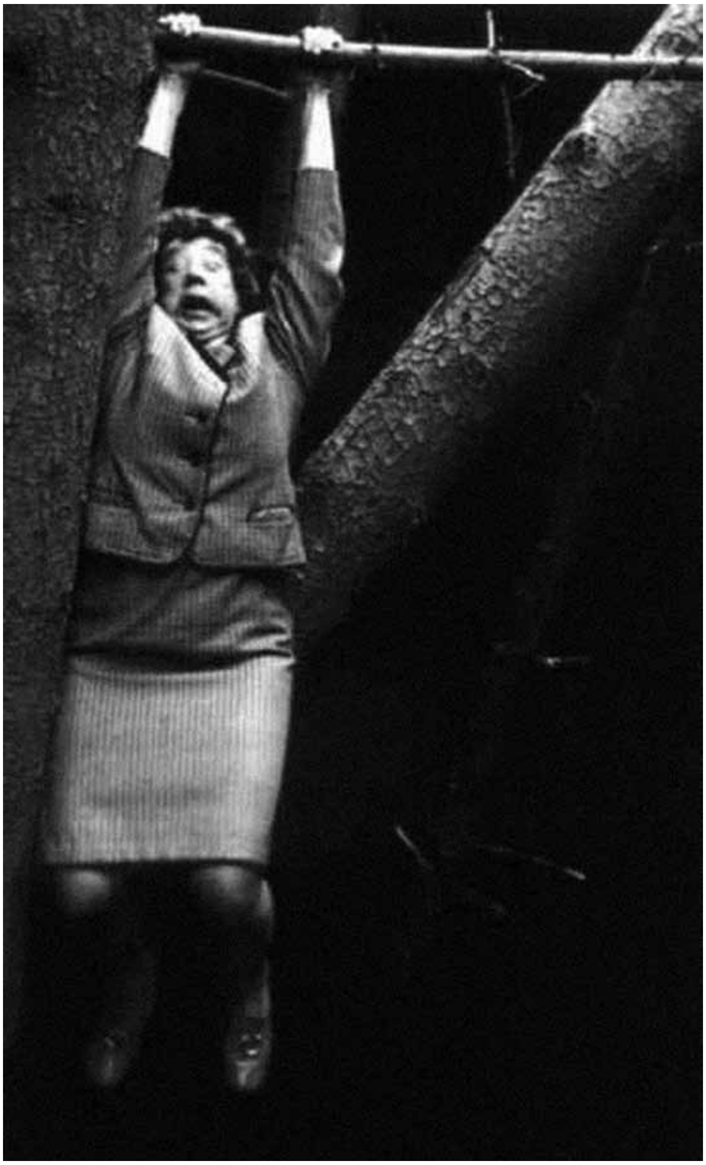
וגם:

Hassner T., Basri R., “Example Based 3D Reconstruction from Single 2D Images“, Beyond Patches Workshop at IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2006



פליס וריני (Felice Varini), "שלושה משולשים כתומים", 2001 / דימוי: ויז'ואלפוטו

האמן השוויצרי פליס וריני (Felice Varini) מצייר בחללים אורבניים וארכיטקטוניים, כמו בניינים, קירות ורחובות. המאפיין העיקרי של עבודותיו הוא קיומה של נקודת תצפית אחת בלבד, ממנה יכול הצופה לראות את הציור בשלמותו – בדרך־כלל צורה גיאומטרית פשוטה, כמו עיגול, ריבוע, קו – כאשר מנקודות תצפית אחרות ניתן לראות רק צורות "שבורות", מקוטעות. לדבריו, עבודת האמנות קיימת כמכלול – על צורתה השלמה, כמו גם על חלקיה. "מה שמעניין אותי", הוא אומר, "זה מה שקורה מחוץ לנקודת התצפית".

חופש הרצון

מריוס אושר

054

מחפשים מבוגר אחראי

מחקרים מדעיים שנערכו בעשרות השנים האחרונות ניסו להוכיח, כי רצון חופשי הוא אשליה בלבד. פרופ׳ מריוס אושר מנסה לסתור מחקרים אלה ומסביר מתי אנחנו באמת נשלטים על־ידי גורם חיצוני, ומתי ניתן לקבוע כי האחריות על מעשינו בעולם אכן מוטלת עלינו



אנה וברנהארד בלום, מתוך הסדרה "ביער" , 1989–1991 / על העבודה והאמנים ראה עמוד 61
Anna & Bernhard Blume: sequence from the series "In the Forest" 1989-1991

כריס, גיבור סרטו של וודי אלן "נקודת מפגש", ניצב בפני דילמה קיומית. מצד אחד, חיים במעמד חברתי גבוה (רכיבה על סוסים, דירה גדולה המשקיפה על נהר התמזה) וקריירה ניהולית מזהירה כחלק מהמשפחה של אישתו הנחמדה־אבל־הלא־מלהיבה קלואי; מצד שני, תשוקה יוקדת לנולה, שחקנית אמריקאית יפה המחפשת עבודה ופרנסה, שאיתה הוא מנהל רומן סוער. כשנולה מבשרת לו שהיא בהיריון ורוצה ללדת את ילדו, הוא שוקל פעולה שתחולל שינוי דרמטי בחייו. לאחר התלבטויות קשות הוא מחליט לרצוח את נולה, כדי לשמור על הנישואין ועל היתרונות שבמעמדו החברתי.

הסרט (שמהדהד את "החטא ועונשו"; אנחנו רואים את כריס קורא בספרו של דוסטויבסקי) משכנע אותנו שכריס אחראי לְפשע שבוצע בהחלטה מודעת ומרצונו החופשי, ולכן הוא ראוי להיענש בכל חומרת הדין. מסקנה זו מתבססת על האינטואיציה הבסיסית לפיה יש לנו אחריות מוסרית על אותן פעולות שאנחנו מבצעים ללא כל כפייה חיצונית, ושבהתאם לכך אנו ראויים לשבח או לגנאי. באופן מפתיע אינטואיציה זו מעוררת בעיה, כי לכאורה, היא איננה מתיישבת עם המחשבה המדעית השלטת היום, ואף לא עם כמה טיעונים קונספטואליים ביחס להיקבעותם מראש של מעשים בחיינו, שהוצגו כבר ביוון העתיקה.

הגישה המדעית הסטנדרטית גורסת, כי פעולות אנושיות הן תוצאה של תהליך המתנהל במוח – כלומר, חלק מרצף של אירועים (כימיים וביולוגיים) הכפופים לחוקי הפיזיקה. חוקים אלה יכולים

>>

"פעולה מוכוונת־מטרה היא תנאי לאחריות מוסרית, תנאי שיכול להסביר את ההבדל בין מה שנקבע על־ידי חוקי הטבע (דטרמינציה) ובין מניפולציה (שבה מישהו חיצוני, דוגמת שליט צפון קוריאה, קובע עבור הסובייקט). פירוש הדבר הוא שאפשר לייחס לאדם אחריות רק אם הוא מוכן להתערב ולפעול להשגת מטרה שתוכננה מראש, ולתקן כל סטייה או פער בין התפתחות האירועים בפועל לבין המטרה הרצויה"

>> להיות דטרמיניסטיים (מאורעות עתידיים שנקבעים מראש), כפי שחשבו המתמטיקאי הצרפתי פייר סימון לפלס ואלברט איינשטיין ("אלוהים אינו משחק בקוביות"), או אינדטרמיניסטיים (מאורעות עתידיים שאינם קבועים מראש), כפי שמלמדת פיזיקת הקוונטים ("הוא כן משחק בקוביות").

דטרמיניזם פיזיקלי (כמו גם ביולוגי־חברתי, לפיו התנהגותנו נקבעת על־ידי גנים וגורמים סביבתיים, כגון מצב סוציו־אקונומי, חינוך וכו') מערער על קיומו של רצון חופשי משום שמשתמע ממנו, שכל הפעולות נקבעות מראש על־ידי רצף ארוך של אירועים (סיבה ותוצאה), שהיו קיימים עוד לפני שמבצע הפעולה נולד. אם נדע את כל ההיסטוריה של רצף האירועים, נוכל לחזות את תוצאותיהם. שרשרת אירועים זו אינה נעצרת במקום כלשהו, מכיוון שלכל תופעה יש סיבה שקודמת לה. בנוסף, כפי שטען הפילוסוף רוברט קיין, מצבנו בעולם דטרמיניסטי (שבו העתיד נקבע על־פי חוקי טבע) דומה למצבם של אנשים הנשלטים על־ידי מניפולטור, אשר באמצעות שטיפת מוח גורם להם לבצע רק פעולות שהוא מעוניין בהן (דוגמת השליט בצפון קוריאה). אדון בתרחישי מניפולציה כאלה בהמשך.

האינדטרמיניזם (ההנחה כי לפחות חלק מהאירועים הם מקריים ואין שום יכולת לדעת מראש שהם יתרחשו) מעמיד בפנינו מכשול מאתגר באותה מידה: **בעיית המזל והמקריות**. כלומר, אם פעולה כלשהי שהאדם עושה היא תולדה של מקריות, איננו יכולים לזקוף אותה לזכותו או לחובתו ולשבח או לגנות אותו בהתאם, שכן התמזל או איתרע מזלו שכך קרה.

דרך, או אסטרטגיה, נוספת להתמודד עם שאלת הרצון החופשי היא כפירה בקיומו ובקיום מושג האחריות המוסרית. אסטרטגיה זו נוגדת את האינטואיציה הבסיסית שלנו בדבר קיומו של רצון חופשי ואינה מתיישבת עם טבעה של הרציונליות במחשבה המעשית והתיאורטית.

כאן אטען שהבעיה של רצון חופשי ואחריות מוסרית קשורה לבעיה נוספת, בסיסית יותר, והיא ההבחנה בין פעולות רצוניות לבין תנועות גופניות סתמיות, בין סוכנים (גורמים שפועלים בעולם; בהמשך אתייחס לבני האדם כדוגמה) לבין אובייקטים. אם לצטט את הפילוסוף חוקר המטפיזיקה סקוט סהון: **"יש לכאורה מתח בין התיאור של עצמנו על־פי השכל הישר כסוכנים פעילים ובין הראייה של עצמנו כאובייקטים פיזיקליים. נראה כי למושגים כמו פעולה/התנהגות מוכוונת־מטרה אין מקום בתיאור הפיזיקלי של העולם. פלנטות, סלעים, חלקיקי יסוד אינם עושים דברים; אם אנחנו (בני האדם) לא שונים מהדברים האלה, אפשר להטיל ספק במעמדנו כסוכנים שעושים דברים".**

הטענה שלי היא שכדי לספק הסבר קוהרנטי לשתי האינטואיציות האלה – זו שאומרת כי יש רצון חופשי וזו שמתייחסת לקיומו של סובייקט/אדם פועל ואחראי – צריך קודם־כול להעביר את המיקוד מדיון בדטרמיניזם ואינדטרמיניזם לאספקט אחר של חוקי הטבע – **דינמיקת התכנסות והתבדרות**, ולהשתמש בו על מנת לפתח תיאוריה של פעולה דרך תהליך של **סיבתיות חזקה** או פעולה **מוכוונת־מטרה.**

תחילה אסקור בקצרה מחקרים חדשים במדעי המוח, שהניעו מספר חוקרים להסיק כי רצון חופשי הוא אשליה. אטען כי זוהי מסקנה נמהרת, שמבוססת על המשגה שגויה של מצבים נפשיים. אחר־כך אנסה להסביר איך אפשר להניח את קיומם של רצון חופשי ואחריות מוסרית, במסגרת חוקי טבע, בעזרת המושג "פעולה מוכוונת־מטרה". היבט מרכזי של גישה זו הוא הנחת היסוד, שקיומו של קשר סיבתי **חזק** בין הסובייקט הפועל ובין הפעולה שהתרחשה במציאות הוא תנאי הכרחי לאחריות מוסרית. אני מתכוון לסיבתיות לא רק בעולם הממשי, אלא גם בקבוצה של עולמות אפשריים, או תסריטים דומים, שלא התממשו בסופו של דבר במציאות. אבחן גם את בעיית המזל ואציע פתרון, שיאמץ את



אנה וברנהארד בלום, "אקסטזת אגרטלים", 1987
Anna & Bernhard Blume, Vasenextase, 1987

המזל כחלק מכונן של זהות הסוכן. לבסוף, אדגים כיצד מודל זה פותר כמה חידות מאתגרות בנוגע לחופש רצון ואחריות.

מה קורה במוח לפני שאנחנו מחליטים?

מחקר חשוב משנות השמונים של המאה העשרים, שנערך על־ידי חוקר המוח בנג'מין ליבט ועמיתיו, משמש הוכחה לטענה שרצון חופשי הוא אשליה. ליבט השתמש בשיטה מקורית כדי לבדוק את סדר הזמנים בין רגע ההחלטה לבין הפעילות המוחית המממשת אותה. המשתתפים במחקר התבקשו להחליט "מתי" להזיז את האצבע שלהם, ולדווח על רגע ההחלטה באמצעות הפניית מבט לשעון עם מחוג שמסתובב מהר מאוד. במקביל, נרשמה הפעילות המוחית (EEG) באתרים המוטוריים שלהם.

התוצאה העיקרית של המחקר הצביעה על כך שהפעילות המוחית שמציינת את רגע ההחלטה, נרשמה כ־300 אלפיות השנייה לפני שהאדם דיווח על מודעותו לקבלת ההחלטה. בניגוד לליבט, שפירש תוצאה זו בזהירות (ראו בהמשך), מדענים אחרים שהתבססו על שיטתו עשו שימוש בתוצאה זו ובתוצאות דומות כדי לטעון, שקיומו של רצון חופשי הוא אשליה. על־פי טענתם, החלטות נובעות מתהליך מוחי לא־מודע, ותחושת הרצון המודע מופיעה רק לאחר שההחלטה כבר התקבלה, ולכן היא רק תופעת לוואי או אשליה (ליבט עצמו לא טען שהתוצאה מלמדת על היעדר רצון חופשי. הוא האמין שרצון מתבטא ביכולת להטיל וטו על החלטות לא־מודעות).

מחקרים חדשים יותר, שמשתמשים בטכניקות הדמיה מתוחכמות (fMRI או הקלטות מתאי מוח בעזרת אלקטרודות עומק) הוכיחו, כי פעילות הקשורה לקבלת החלטות שנרשמה באזורים מוחיים שונים, מקדימה החלטות מודעות ביותר מחמש שניות. ניתוח של פעילות זו מאפשר לחוקרים לחזות מראש מה אדם יחליט בהסתברות של 60% (10% יותר מהסתברות מקרית, שהיא 50% עבור בחירה בין שתי אפשרויות).

תוצאות אלה מעניינות כשלעצמן, אבל האינטרפרטציה שלהן כהוכחה לכך שרצון חופשי הוא אשליה, היא בעייתית. ראשית, יש שאלות מתודולוגיות לגבי היכולת לסמוך על הדיווח של המשתתפים בנוגע לרגע ההחלטה שלהם. מדובר בשיפוט עצמי (הבוחן את רגע ההחלטה) שהוכח כי אינו אובייקטיבי, שכן הוא מושפע מאירועים שהתרחשו לאחר רגע ההחלטה. בעיה קשה יותר שמעורר טיעון האשליה היא, שהוא איננו מביא בחשבון הבדל קונספטואלי יסודי בין שני מצבים מנטליים שונים: הדחף (או התשוקה) לפעול לעומת ההחלטה (או הכוונה) לבצע פעולה. אדם יכול, למשל, להרגיש דחפים לבצע פעולות שונות, בלי להחליט, או להתכוון, לבצע אף אחת מהן.

בניסוי של ליבט ייתכן מאוד שהפעילות המוחית הקשורה להחלטה משקפת הופעה של דחף לפעול, שאכן מתעורר בלא־מודע לפני שההחלטה התקבלה והכוונה נוצרה. לפי פירוש זה, הכוונה היא עדיין זו ששולטת בביצוע הפעולה או בפסילתה, ולכן היא איננה תופעת לוואי אשלייתית. יתר על כן, ברור כי העובדה שההסתברות לנבא תוצאה של החלטה גבוהה ב־10% מהסתברות מקרית כשאנו מתבססים על הטיות לא־מודעות (למשל, דחפים), אינה מערערת על תפקידו של הרצון המודע בשליטה על הפעולה. רוב הפילוסופים מסכימים כי החלטות מודעות הן תוצאה של תהליך מורכב שמתחיל ברמת הלא־מודע, אך דבר זה אינו סותר את חשיבותן של הכוונות המודעות בשרשרת הפעולה.

נימוקים אלה מערערים את הטענה, שתוצאות ניסויים מדעיים מוכיחות כי הרצון החופשי הוא אשליה. ברצוני להציע גישה

>>

>> אחרת: להשתמש במחקרים ובתיאוריות מדעיות חדשים שהצטברו בתחומי הפסיכולוגיה, מדעי המוח והמערכות הדינמיות, כדי לתת תוקף לאפשרות של רצון חופשי ולנסות ולהסביר את טבעו.

לתכנן פשע בכמה עולמות

לפי ההסבר המקובל בפילוסופיה, פעולות אנושיות הן תוצאה של מצבים מנטליים (כמו אמונות, רגשות ומשאלות) של הסובייקט הפועל. הפילוסוף וחוקר התודעה האמריקאי הארי פרנקפורט עמד לראשונה על בעיה שמעורר הסבר מקובל זה. כפי שפרנקפורט הראה, משתמע מההסבר כי אפשר להבחין בין תנועות סתמיות ובין פעולות מכוונות רק על־פי האירועים שהתרחשו לפני שהן נעשו (כלומר, הפעולות נובעות ממצבים מנטליים של האדם הפועל). לפיכך, ההבדל בין פעולות לתנועות נמצא בעבר, ולא באופן שבו הפעולות או התנועות נעשות בהווה.

נבחן דוגמה הממחישה בעיה שההסבר המקובל מתקשה להתמודד איתה: נניח, למשל, שמספר בני אדם מתכננים שוד ומסכמים ביניהם, כי אחד מהם יצטרך לשפוך כוס מים על מנת לאותת לאחרים להתחיל במשימה. ברגע האמת הדברים משתבשים, וזה שאמור היה לשפוך את המים נתקף בחרדה ומחליט לבטל את השוד ולא לשפוך את המים. דא עקא שבסופו של דבר ידו רועדת מפחד והמים נשפכים בטעות (והשוד מתבצע כמתוכנן). ברור לנו שאף כי שפיכת המים נגרמה על־ידי מצב מנטלי של הסובייקט (רצון לאותת שגרם לחרדה), היא איננה פעולה מכוונת. על מקרים כגון זה אומר פרנקפורט, כי הניסיון לאתר את המאפיין המובהק של הפעולה באירועים שקדמו לה, במקום בתהליך ההתפתחות המנטלי שלה, יוצר בעיה.

בעבודות חדשות יותר שלי המשכתי לפתח את הרעיון הזה. טענתי כי פעולה מוכוונת־מטרה היא תנאי לאחריות מוסרית, תנאי שיכול להסביר את ההבדל בין מה שנקבע על־ידי חוקי הטבע (דטרמינציה) ובין מניפולציה (שבה מישהו חיצוני, דוגמת שליט צפון קוריאה, קובע עבור הסובייקט). פירוש הדבר הוא שאדם יכול להיות אחראי מוסרית רק לפעולה שהיא מוכוונת־מטרה, במובן זה שהוא מבצע את הפעולה בדרך **סיבתית חזקה**. ביצוע פעולה באופן זה פירושו להיות מוכן להתערב ולפעול להשגת מטרה שתוכננה מראש, ולתקן כל סטייה או פער בין התפתחות האירועים בפועל לבין המטרה הרצויה.

פעולה מוכוונת־מטרה (או כזו המאופיינת בסיבתיות חזקה) מתבצעת על־ידי בני אדם שרוצים לחולל אירוע למרות ההפרעות הפוטנציאליות של הסביבה. מאפיין חשוב של גישה זו הוא, שאדם יכול להיות אחראי לפעולה (לדוגמה, רצח) רק אם היה מבצע אותה לא רק בעולם הממשי, אלא בקבוצה של עולמות מקבילים דומים. אם נחזור לדוגמה של הרצח, מי שמתכנן לבצע את הפשע במוחו, צריך לקחת בחשבון מספר תסריטים אפשריים שונים. למשל, שהקורבן יזוז לפתע, או שיימצא בחדר אחר ממה שהעריך הרוצח מראש. כל מצב עניינים דומה, אך לא זהה, כמו מיקומו המדויק של הקורבן, יכול להוות סטייה מהמטרה המתוכננת (רצח) – ולכן, אם הרוצח פועל מתוך סיבתיות חזקה, הוא ירצח את הקורבן בין אם הוא נמצא במיקום א' (עולם אפשרי א') ובין אם הוא נמצא במיקום ב' (עולם אפשרי ב'), על־ידי תיקון הסטייה מתכניתו המקורית.

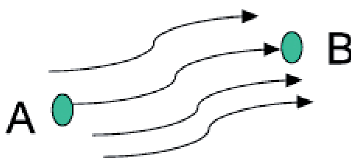
מעניין לראות כי גם בעולם המשפט נהוג לתת את הדעת על השאלה, האם הנאשם בחן מצבים שונים של מציאות, כאשר אנחנו מטילים עליו אחריות חוקית ומוסרית ביחס לביצוע פעולה מסוימת. מידת האחריות או האשמה שתיוחס לאדם תהיה גבוהה יותר, אם ביצע רצח שתוכנן מראש או שכלל "וידוא הריגה", מאשר אם רצח מתוך "להט רגעי". דוגמה נוספת לסיבתיות חזקה היא התייחסותנו לאופן שבו הובקע שער בכדורגל. שחקן נתפס כאחראי יותר להישג אם הבקיע את הגול בכדרור לתוך השער,

"סובייקט פועל אחראי לפעולה, כאשר אפשר להתחקות אחר סיבותיה עד שמגיעים אליו. כלומר, ניתן לאתר את התחלתה של השרשרת הסיבתית שמובילה להשלמת הפעולה בסוכן עצמו (אבל לא מעבר לו, באירועים קודמים). רעיון זה תואם את המשפט המפורסם שהתנוסס במשרדו של הנשיא טרומן: 'האחריות נעצרת כאן', אשר מבטא את הרעיון שכל החלטה שלו היא מקור ראשוני לאחריות"

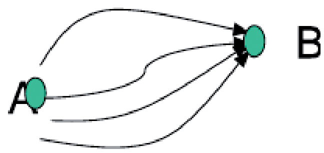
מאשר אם הכדור פגע בגבו ונכנס לשער. על אף שבשני המקרים השחקן הוא הסיבה הישירה להבקעת השער, רק במקרה הראשון פעולתו מאופיינת בסיבתיות חזקה, שמתבטאת ביכולת להתמודד עם הפרעות במשחק.

כאן צריך להכניס מושג פיזיקלי נוסף, שישרת אותנו במודל הרצון החופשי ויעזור לנו להבחין בין התרחשות דטרמיניסטית גרידא לבין פעולה מכוונת־מטרה. המרכיב של המציאות הפיזיקלית שמאפשר יצירת סיבתיות חזקה ופעולה מכוונת־מטרה ומסייע בחיזוי התנהגות של בני אדם רציונליים הוא **דינמיקת אטרקטורים** (בעברית, מרכז או איזור משיכה). אטרקטורים והסתעפויות הם תכונות דינמיות, שמופיעות במערכות מורכבות לא־לינאריות. האטרקטור מקביל לסופו של מסלול אליו מתכנסות דרכים ולכן שינויים או הפרעות מהמסלול לא משפיעים על המסלול הסופי, אשר מתכנס אל איזור המשיכה. **להבדיל מאטרקטור, הסתעפות היא מצב של תהליך דינמי, שבו ההתפתחות העתידית רגישה לסטיות הקטנות ביותר.**

כדי להבדיל בין פעולה דטרמיניסטית לבין פעולה מכוונת־מטרה נשתמש במודל של דינמיקת אטרקטורים. דינמיקה כזאת מופיעה ברגע שהתהליך הפיזיקלי כולל לולאות של תיקון שגיאות. למשל, בדוגמה של טיל מונחה (איור 1), בניגוד לקליע ישיר (איור 2).



איור 1 (סיבתיות חזקה): A → B
למשל, טיל מוכוון מטרה



איור 2 (סיבתיות לא חזקה): A → B
למשל, קליע נורה אל מטרה

בעיית המזל והרצון החופשי

בני אדם מבצעים פעולות מכוונות־מטרה על סמך כוונות ותכניות, אבל כוונות אלה נובעות לעתים קרובות משיקולים מורכבים, שמעוצבים על־ידי נימוקים או מניעים מנוגדים. אדם יכול, למשל, להתלבט בשאלה, האם להזמין לקינוח עוגת שוקולד או סלט פירות, בהתבסס על מגוון שיקולי בריאות ושיקולים רגשיים. גם אם הפעולה של הזמנת סלט פירות נתונה לשליטתו של האדם, ברגע שהוא קיבל החלטה ויצר כוונה, בעיית הרצון החופשי מתעוררת ביחס לשליטה שיש לו על ההחלטה עצמה. בניגוד לפעולה מכוונת, תהליכי ההחלטה מתאפיינים **בדינמיקת התבדרות/הסתעפות**, שהיא רגישה מאוד להפרעות. מחקר חדש על התשתית העצבית של קבלת החלטות מדגיש את תפקידם של האטרקטורים וההסתעפויות במנגנון ההחלטה. במחקר הנוכחי שלנו אנו בוחנים את ההיפותזה, לפיה אחרי החלטה מקדמית מתחולל שינוי דרמטי ברגישות למידע הנוגע להחלטה.

על מנת להמחיש זאת, הבה נבחן את הדוגמה הבאה: אדם מתכוון לרכוש דירה. לאחר שהקדיש חודשים רבים ומאמץ לראות כמה דירות ולהתרשם מהן, הוא שוקל בכובד ראש את כל היתרונות והחסרונות של כל דירה שראה, ולבסוף הוא מקבל החלטה ומדווח עליה למתווך. עכשיו, במרווח הזמן לפני החתימה על החוזה, הוא נוטה להתעלם מכל מידע חדש על הדירה, גם אם הוא עשוי להיות רלוונטי עבורו. אם הוא פועל כך, יהיה בכך כדי להוכיח נוכחות של שני שלבים שונים במהלכה של פעולה חופשית. בשלב הראשון (שלב ההסתעפויות) תהליך ההחלטה רגיש מאוד לאינפורמציה ואפילו ל"רעש" (הגורם לאקראיות) בעיבוד האינפורמציה. הוא מסתיים עם מציאת קריטריון להחלטה, שמפעיל שלב שני (שלב האטרקטור או ההתכנסות), שהוא, בעיקרו, התכנון לביצוע הפעולה וייצוב ההחלטה הראשונית, ובמהלכו יש מעט מאוד רגישות לאינפורמציה חדשה. זהו השלב שבו הסובייקט הפועל מבטא סיבתיות חזקה, העוזרת לו להוציא את תכניתו לפועל גם לנוכח מכשולים.

לאור הרגישות של תהליך ההחלטה הראשונית ניתן לטעון, שההכרעה תלויה לעתים קרובות במזל. כלומר, באותה סיטואציה עצמה האדם יכול היה לפעול אחרת, והדבר תלוי בתהליך מקרי כמו זריקת מטבע. טענה זו מערערת את הנחת האחריות המוסרית של בני אדם על תוצאות פעולתם.

אדגים את הטענה בדוגמה הבאה: אדם ממהר לישיבה ובדרך נתקל במישהו הנתון במצוקה. הוא נקלע לדילמה, האם לעזור לאומלל, או להתעלם ממנו כדי להגיע בזמן לישיבה. אם תוצאת החלטתו היא עניין של מזל – דהיינו, אילו במצב היפותטי בו היינו מחזירים את העולם לקדמותו מאה פעמים (או, לחלופין, אילו התבוננו במאה עולמות מקבילים דומים לשלנו), בחצי מהפעמים הוא היה בוחר לעזור לאדם במצוקה ובחצי השני להמשיך לפגישה (על אף שבכל הפעמים היו לו אותן כוונות ואותה דילמה) – אזי לא יהיה זה סביר לגנותו או לשבחו על החלטתו, כי הרי פעולתו היא מקרית ואיננה בשליטתו. כשתהליך ההחלטה הוא הסתברותי –

>>

כלומר, כאשר בהישנות של פעמים רבות הוא יסתיים לפעמים ב־A ולפעמים ב־B, או אם יש עולמות דומים לעולמות הממשיים שבהם הסובייקט הפועל יעשה A ועולמות אחרים שבהם הוא יעשה B – אפשר לומר שלסובייקט הפועל אין שליטה על עשיית A במקום B. אז מתעוררת **בעיית המזל בין־העולמות.**

חשוב לציין כי בעיית המזל אמנם מוצגת לעתים קרובות כאיום על קיומו של רצון חופשי בעולם אינדטרמיניסטי, אבל היא מעמידה קושי חמור באותה מידה בפני תיאוריות דטרמיניסטיות, הטוענות כי הכול קבוע מראש. גם בעולם דטרמיניסטי תוצאה של החלטה תלויה הרי בווריאציות הסביבתיות הקטנות ביותר (תשדיר פרסומת ששמענו ברדיו, דברים שהתרחשו בילדותנו, וכן הלאה), אשר אינן נתונות לשליטתנו.

אני מאמין כי בעיית המזל בין־העולמות היא בלתי נמנעת, וכי היא מאיימת במידה שווה על תיאוריות אינדטרמיניסטיות ודטרמיניסטיות של רצון חופשי ואחריות מוסרית. כדי להדגים את האיום על תיאוריות דטרמיניסטיות, נחשוב על גנב שמודה בבית־המשפט כי הסיבות לגניבה הן אנוכיות וחוסר רצון לעבוד למחייתו, אבל טוען כי לא רצה להיוולד אנוכי, ורק המזל (גנים מסוימים) גרם לו להיוולד כזה.

ברור כי רק אנשים מעטים יקנו את הטיעון הזה. דרך אחת להתנגד לו היא לקבל את המזל כמרכיב מהותי בזהות בני האדם. הרעיון הוא שהזהות שלנו תלויה בתכונות שלנו (אפילו אם אלה מקריות ותלויות בגנים, חינוך וכיו"ב), ולכן לא יהיה זה נכון לומר שמזל (או חוסר מזל) מעניק לנו חנינה מתכונה מנטלית כזאת או אחרת. התכונות המנטליות הן אלה שמכוננות את הזהות שלנו. אילו הגנב היה נולד לא־אנוכי, הוא היה נעשה אדם שונה לגמרי.

אפשר להשתמש ברעיון דומה כדי לחלץ את הרצון החופשי ואת האחריות מבעיית המזל בין־העולמות. פעולות של בני אדם תלויות חלקית במזל, כמו אותן פעולות שנקבעות על־ידי גנים וחינוך, שמוביל אדם לבחור ב־A במקום ב־B בסיטואציה ספציפית. עיקרו של דבר הוא, שהסובייקט הפועל הוא ישות שמתקיימת בזמן "מורחב" (התודעה אינה רגעית, אלא בעלת נפח־זמן, בהיותה תהליך מתמשך). לפיכך, ישות זו קולטת באמצעות ההחלטות שלה ערכים על־ידי תהליך של הזדהות. אם נחזור לדוגמה של האדם המתלבט אם לעזור לזולת במצוקה או להמשיך לפגישה, כאשר ההחלטה מתקבלת (ואפילו אם היא בעלת אופי הסתברותי), האדם מזדהה עם החלטתו, ובסופו של דבר, ההזדהות הזו הופכת לחלק מכונן של אישיותו, בדומה לגנב, שהגנים האנוכיים שלו הם חלק מזהותו.

אני טוען כי דינמיקה של **התכנסות/הסתעפות** היא המאפיין הקריטי של מציאות פיזיקלית, שמאפשרת לנו למקם בעולם סוביקטיים פעילים שנתפסים כמקור לאחריות – כאלה שמסוגלים להפעיל סיבתיות חזקה על אירועים. הרעיון הוא שסובייקט פועל אחראי לאירוע בעולם כאשר אפשר להתחקות אחר סיבותיו (החזקות) של האירוע עד שמגיעים חזרה אל הסובייקט. כלומר, ניתן לאתר את התחלתה של השרשרת הסיבתית שמובילה לאותו אירוע בסובייקט־הפועל עצמו (אבל לא מעבר לו, באירועים קודמים).

הסבר זה מאפשר לנו להתייחס גם לבעלי חיים כאל סובייקטים פועלים, ואף ניתן להחיל אותו על ישויות פועלות לא־ביולוגיות. למשל, האחריות להריסת בית מחזירה אותנו אחורה אל הטורנדו שמחק אותו, או אל הטרוריסט שתכנן לפוצץ אותו. בשני המקרים אנחנו מגיעים להסתעפות (למשל, היווצרות סופת הטורנדו), שאי־אפשר להתחקות אחר הסיבות מעבר לה; אין אירוע קודם לנקודה זו שיכול לספק הסבר חזק לפעולת ההרס. רעיון זה תואם את המשפט המפורסם שהתנוסס במשרדו של הנשיא טרומן: "האחריות נעצרת כאן", אשר מבטא את הרעיון שכל החלטה שלו היא מקור ראשוני לאחריות. תמונה זו שונה במובהק מהסיטואציה שהייתה מתקיימת בעולם דטרמיניסטי, בהיעדר שלבים של דינמיקת התכנסות/התבדרות. אנו יכולים לחזור אחורה עד למפץ הגדול, כדי להצביע על האחראי להרס של הבית.

בין שטיפת מוח לחינוך

תרחישי מניפולציה נמנים עם הטיעונים המאתגרים ביותר שהועלו נגד הקומפטיביליזם, הגישה הפילוסופית הגורסת שאין סתירה בין רצון חופשי לקיומו של עולם דטרמיניסטי. אסקור בקצרה שני טיעונים כאלה, ולאחר מכן אדגים כיצד תיאוריית ההתכנסות/התבדרות יכולה להשיב עליהם.

הטיעון הראשון נוסח על־ידי רוברט קיין, הפילוסוף האמריקאי חוקר בעיית הרצון החופשי שהוזכר לעיל. קיין מבקש מאיתנו לדמיין קהילה (למשל, קהילת ואלדן שתיים המתוארת ברומן האוטופי "ואלדן שתיים" של הפסיכולוג ההתנהגותי ב.פ. סקינר), שבה מחנכים ילדים לפי שיטת לימוד לא־כפייתית המבוססת על התניה חיובית, שיטה שפותחה על־ידי סקינר, שהאמין שכך ניתן לגדל ילדים אשר יקבלו על עצמם את מערכת הערכים של ראש הקהילה. בהנחה שהשיטה יכולה לעבוד, אומר קיין, איך נתפוס את המעשים של ילדים אלה בבגרותם? לכאורה, נראה כי בהתייצבם מול דילמות שונות אנשים אלה יבצעו פעולות מרצונם החופשי, אבל בעינינו, ההחלטות והפעולות שלהם אינן אוטונומיות, שהרי הן מבוססות על ערכים שמנהיג הקהילה (המשמש פה כאינדוקטרינטור המבצע את המניפולציה) שתל בהם, ולכן האחריות האולטימטיבית לפעולות שלהם נמצאת אצל



אנה וברנהארד בלום, "אקסטזת אגרטלים", 1987
Anna & Bernhard Blume, Vasenextase, 1987

צמד האמנים הגרמנים אנה וברנהארד בלום (Anna & Bernhard Blume) יצרו ביחד מיצבים, סדרות של צילומי סצנות גדולים, וכן, בשנות התשעים של המאה העשרים בעיקר, תמונות פולרואיד. הם העמידו וצילמו סצנות שבהן הם מופיעים בעצמם, לצד אובייקטים שכמו מקבלים "חיים" משל עצמם. השניים משתייכים לקבוצת בורס הגרמנית Deutsche Börse Group שגורסת כי על האמנים לבצע את כל התהליך הכרוך בהפקת היצירה ללא סיוע חיצוני, ובהתאם לכך הם גם אלה שמתכננים את התפאורה והתלבושות, מפתחים את התשלילים ומדפיסים הגדלות של הצילומים, כשבכל שלב עבודת האמנות עוברת תהליך של זיקוק.

אירוניה היא מוטיב חוזר בעבודותיהם של האמנים, אשר מתמקדים בהצגת חוויות יומיומיות ושגרתיות, תוך שימוש בחפצים מוכרים, בסביבת מגורים פרטית, כמו סלון, חדר, עליית גג, וכדומה. הצילומים – אנלוגיים, גדולי-ממדים ובשחור לבן – מוצגים לרוב כסדרה בעלת רצף אירועים המובילים לתוצאה, שנראית בלתי הגיונית על גבול האבסורד. כך, למשל, אגרטל שהאמן מחזיק מתחיל לרעוד בידיו, מקבל "חיים" ומתעופף לכל העבר. או, בעבודה אחרת, האמנים מטפסים על עץ, מאבדים שיווי משקל ונתלים בהבעה מבועתת על ענפיו ומסיימים בצניחה חופשית על הקרקע. האמנים עצמם מצולמים בתוך סצנות מורכבות, שמצטטות זרמים בתולדות האמנות, כמו קונסטרוקטיביזם רוסי, סוריאליזם, דאדא ואוונגרד קלסי.

<< אותו מנהיג. בהתבססו על תרגיל מחשבתי זה מבקש קיין ממי שרוצה ליישב בין רצון חופשי ודטרמיניזם להסביר, באיזה אופן אנחנו, שנשלטים על־ידי החוקים הדטרמיניסטיים של הטבע, שונים מהילדים ה"חופשיים" שחונכו בקהילת ואלדן שתיים. לפי קיין, בשני המקרים אנו פועלים כמריונטות.

הטיעון השני נגד הקומפטיביליזם הוצג על־ידי אלפרד מלה, פילוסוף מאוניברסיטת פלורידה, אשר עומד בראש תכנית טמפלטון לחקר הרצון החופשי. מלה מבקש אותנו לדמיין שהאלה דיאנה שותלת ביצית מופרית ברחם של אישה, מרי, שבהינתן הידע המושלם של דיאנה בחוקי הטבע ובמצבו של העולם הדטרמיניסטי, תתפתח לאדם בשם ארני, שבעוד שלושים שנה יעשה את המעשה אשר יגרום למאורע E. מלה טוען כי הקומפטיביליסטים יתקשו להתמודד עם האינטואיציה החזקה לפיה ארני, כמו בדוגמה של ואלדן שתיים, הוא רק מריונטה, ומי שנושא באחריות האולטימטיבית לפעולה שהביאה לתוצאה E, ואולי לכל הפעולות שארני יבצע אי־פעם, זו האלה דיאנה.

תיאוריית ההתכנסות/התבדרות פותרת, לדעתי, את הבעיות האלה – בראש ובראשונה, על־ידי כך שהיא קובעת הבדל ברור בין דטרמינציה של חוקי טבע לבין התערבות של מניפולטור. אירוע מסוים נקבע בצורה דטרמיניסטית כאשר הוא נובע ממצבו של העולם בעבר. בניגוד לכך, כדי לחולל אירוע באופן מניפולטורי, יש לקיים דרישה חזקה יותר. מניפולטור אמור לפעול באופן מכוון־מטרה, על־ידי סיבתיות חזקה לגרום לאנשים תחת שליטתו לקבל על עצמם את הערכים שהוא שתל בהם. עתיד אנשים אלה נקבע לחלוטין על־ידי המניפולטור, אשר יוכל (במידה מסוימת) להתגבר על מאמציהם של אלה הנתונים להשפעתו לפעול בניגוד לרצונו.

נחזור לסיטואציה של ארני ודיאנה ונתמקד בשאלה הבאה: האם לדיאנה יש סיבתיות חזקה, והיא מבצעת פעולה מכוונת־מטרה ביחס לאירוע E עצמו, ובאופן גורף יותר, ביחס לכל הפעולות האחרות שארני יעשה אי־פעם? אם התשובה שלילית, וכך צריך להיות, הרי שהנחת המוצא היא שכאשר דיאנה יצרה את הביצית המופרית שתתפתח לארני, היא חשבה רק על העולם שבו פעלה. במקרה כזה אפשר להסכים שדיאנה אינה אחראית ל־E, כי בלי סיבתיות חזקה קודמת ביחס למצבים המנטליים של ארני, האחריות על הפעולות שלו אינה יכולה להיות מושלכת אחורה, מעבר לו, ואי־אפשר לטעון כי דיאנה גרמה לו לפעול.

יש מובן אחד שבו אפשר לייחס לדיאנה כוחות חזקים יותר על עתידו של ארני – וזה במקרה שהיא ראתה מול עיניה כמה עולמות עתידיים אפשריים, ויצרה את הביצית המופרית כך שתוכל לחולל את E בכל אחד מהם (בינתיים נשאיר את השאלה, אם יש אפשרות מטפיזית כזאת, פתוחה). בהנחה כזאת היא נמצאת בסיטואציה של האינדוקטרינטור בוואלדן שתיים, ויש לה סיבה חזקה ביחס לאירוע E, כך שאפשר להתחקות על האחריות ליצירתו עד אליה.

סיכום

פתחתי בהתנגדות לשימוש הלא־מוצדק בנתונים ממדעי המוח כדי לטעון, שרצון חופשי הוא אשליה. עכשיו נותר בפנינו האתגר להסביר, באיזו דרך האינטואיציה הבסיסית לפיה אנחנו סוכנים אחראים המהווים מקור לפעולות, מתיישבת עם המסגרת המדעית הנוכחית. הסכֵּמה המוצעת כאן לפעולה חופשית ואחריות מוסרית היא אגנוסטית ביחס לשאלה, האם חוקי הפיזיקה כפופים לדטרמיניזם או לאינדטרמיניזם. במקום זה היא מציגה שני יסודות מרכזיים של העולם הפיזיקלי, שמאפשרים לנו לראות אותו כמורכב מסוכנים שנושאים באחריות לאירועים מסוימים.

היסוד הראשון הוא קיומה של דינמיקת אטרקטורים, שהיא הבסיס של סיבתיות חזקה ושל אחריות לאירועים המתרחשים בהשפעת סיבתיות זו. הרכיב השני הוא קיומה של שרשרת שלבים בדינמיקה של אטרקטורים והסתעפויות, שיוצרים גבולות שמעבר להם אי־אפשר לגלגל אחורה ללא הגבלה את האחריות לאירועים. אטרקטורים והסתעפויות כאלה יכולים להסביר לא רק החלטות או כוונות ספציפיות שאדם מוציא לפועל, אלא גם מאפייני אישיות אידיאולוגיים יציבים יותר (למשל, הומניזם או גזענות). בעזרת המסגרת התיאורטית הזאת אפשר לגלגל אחורה את האחריות לפעולה עד לאטרקטור המוקדם ביותר, שהיה **כלי במסגרת פעולה מכוונת־מטרה**. פעולה מכוונת־מטרה שמופעלת על סוכן מבחוץ, מאפיינת סיטואציות של היעדר שליטה ואחריות מופחתת, כמו מניפולציה או אינדוקטרינציה.

ההסבר הזה מאפשר לנו להבחין בין מקרים של אינדוקטרינציה ובין מקרים שקובעים את עתידנו באופן סביר – כמו חינוך, למשל – ואינם מסירים מאיתנו את האחריות.

ההבדל במצבם של אנשים הנתונים להשפעות רבות, כגון חינוך וכו', לבין מצבו של אדם הסובל משטיפת מוח הוא בכך, שבעוד שהערכים של אנשים החיים בחברה ליברלית מושפעים מגורמים רבים ויכולים להתייצב בצורות רבות, ערכיו של האדם הנתון לשטיפת מוח נקבעים בצורה קשיחה (סיבתיות חזקה הבולמת הפרעות) על־ידי האינדוקטרינטור, השולל ממנו אפשרויות שונות. לכן, במקרה כזה האחריות האולטימטיבית לפעולות מוליכה אל האינדוקטרינטור.

בניגוד לאדם שחינוכו הושתת על שטיפת מוח, מבנה הערכים של אנשים הגדלים בחברה פלורליסטית שנתונה להשפעות רבות, תלוי **במזל מכונן** (הוא יהיה אדם שונה, אם אחד הגורמים סביב ישתנה). אדרבה, לעומת האחידות אליה מובילה האינדוקטרינציה, סימן היכר חשוב של חינוך טוב הוא **מגוון** הערכים והרעיונות שהוא מוליד.



טוקי ין, "דנ"א / Thoki Yenn "DNA", Photo: Daniele Adami - Flickr

עידו בצלת

לקפל את הגנטיקה מחדש

האדם, ששולח חלליות לכוכבים רחוקים ומבצע שם פעולות מורכבות ומדהימות, לא מצליח בינתיים לבנות מכונה שתרפא באופן יעיל סרטן. ד"ר עידו בצלת מתאר כיצד מצב זה צפוי להשתנות בעתיד באמצעות שיטה הנקראת דנ"א אוריגמי, המאפשרת לפתח רובוטים זעירים שיוכנסו לגופנו וינצחו מחלות באופן יעיל ומדויק

>> זה אלפי שנים בונים בני אדם כלים ומכונות, על מנת שאלה יסייעו להם בביצוע עבודות קשות ובפתרון בעיות מורכבות. הודות למתמטיקאים כמו ג'ון פון־נוימן בארה"ב ואלן טיורינג באנגליה, הצטרף לקראת סוף מלחמת העולם השנייה המחשב האלקטרוני, בעל התוכנה הניתנת לאחסון, לערכת הכלים של המין האנושי. תוך זמן קצר ביותר הטביעו המחשבים חותם בל־יימחה על החברה, הכלכלה, המדע והתרבות שלנו. לרובנו כבר קשה לדמיין איך חיו אנשים בלעדיהם.

אף על פי כן, ישנו תחום אחד שבו טרם הצלחנו לעשות שימוש משמעותי במחשבים אמיתיים: מדובר בתחום הביולוגי, וביתר דיוק, בגוף שלנו או בגופם של בעלי חיים אחרים. מתברר שקשה מאוד לבנות ולהפעיל בצורה מוצלחת מחשב ש"יתקשר" עם תאים חיים או עם מולקולות בתנועה, יקבל מהם קלט ביולוגי, יבצע פעולה חישובית כלשהי וייצר פלט שיתורגם לפעולה על התא או המולקולה. יכולתנו להפעיל מחשבים זעירים בגוף החי עדיין מוגבלת ביותר ועומדת ביחס הפוך להתקדמות המטאורית שלנו במחשבים בעולם ה"מקרו". אם נחשוב על מחלה כעל בעיה הדורשת פתרון, הרי שהכלים, או ה"מכונות", המשמשים אותנו כיום כדי לרפא מחלות – תרופות כימיות – הם, על־פי־רוב, מולקולות קטנות, המסוגלות לבצע פעולה אחת נתונה. מולקולות אלה מאותרות באקראי באמצעות סריקות של אלפי כימיקלים, כאשר אין כמעט דרך להקיש מהמבנה שלהן על דרך הפעילות, האפקטים ותופעות הלוואי הצפויות שלהן. אין גם כמעט דרך להקיש מהכרת הקשר או ממבנה הפעילות של תרופה אחת לגבי המבנה של תרופה אחרת. האספקט המעניין ביותר הוא, שהתרופות נותרות אותן תרופות, אולם המטרות שנגדן הן פועלות – חיידקים, נגיפים או תאי סרטן – עוברות אבולוציה תמידית ועשויות לפתח עמידות בפני תרופות, תופעה שאכן נצפית תדיר. כאשר נרכשת עמידות כזו, אין ברירה אלא להחליף תרופה.

לסיכום, אנחנו מסוגלים לתכנן ולבנות מכונות שטסות לחלל, נוחתות על המאדים, מבצעות חישובים מורכבים בשניות ומעבירות אלינו תוצאות וצילומים, אולם איננו יכולים לתכנן מכונה שתרפא סרטן או תשנה את הביולוגיה של יצור חי על־פי דרישה. כיום קשה אפילו לדמיין כיצד ומאילו חומרים תהיה מכונה כזו בנויה.

לתכנת את הדנ"א

לפני כשלושים שנה העלה ביוכימאי בשם נדריאן (נד) סימן (Seeman) מאוניברסיטת ניו־יורק את הרעיון, שאפשר לתכנת את מולקולות הדנ"א, החומר הגנטי של כל יצור חי כמעט, ולהשתמש בהן כחומר בנייה לצורך הרכבת מבנים דו־ממדיים ותלת־ממדיים מורכבים, ברמת דיוק ננומטרית. התכונה היסודית של הדנ"א, המאפשרת לו לשמש כחומר בנייה מסוג זה, היא ההתאמה (קומפלמנטציה) בין "אותיות" או בסיסים.

דנ"א ניתן לתיאור כמחרוזת, בעלת אורך בלתי־מוגבל עקרונית, של בסיסים חנקניים מארבעה סוגים: אדנין (A), תימין (T), ציטוזין (C), גואנין (G). "חוט" המחרוזת עשוי משרשרת של פוספט (זרחן) וסוכר הערוכים לסירוגין. בצורתו הטבעית בתא, דנ"א מורכב למעשה משני חוטים כאלה, הערוכים בצורת הסליל הכפול המפורסם. בסיסי (אותיות) הדנ"א אינם סדורים באקראי, אלא יוצרים צמדים מדויקים: A־T, G־C. כלומר, אות A על חוט דנ"א אחד לעולם תיצור צמד עם אות T על חוט דנ"א שני, ו־G עם C (פרט לחריגים נדירים ביותר). כאשר נתונים שני חוטי דנ"א בעלי רצפים של אותיות המשלימות זו את זו, החוטים ייצמדו בכוח. אזורים המשלימים זה את זה אשר נמצאים על אותו חוט, יגלו נטייה להיצמד וליצור מבנה הידוע כ־hairpin – סיכת שיער.

את התכונה הזו של הדנ"א ניתן לנצל. כיום ניתן בקלות ובעלות נמוכה יחסית להזמין חוטי דנ"א בעלי רצף רצוי, לפי הזמנה מחברה. ניתן לתכנן מבנה מחוטי דנ"א, להזמין את החוטים ולערבבם, ותיאורטית, לקבל את המבנה המבוקש ללא מאמץ נוסף. סימן השתמש בשיטה זו כדי לבנות מבנים בעלי קישוריות ידועה, כגון קוביות, צמתים שונים, גופים גיאומטריים וכדומה.

בשנת 2006 הגה פול רותמונד (Rothemund) מהמכון הטכנולוגי של קליפורניה את הרעיון הקרוי "דנ"א אוריגמי". מקור השם הוא באמנות קיפול הנייר היפנית, שבה יוצרים אינסוף צורות מקיפול דף נייר אחד. רותמונד הציע לקחת חוט יחיד של דנ"א ולקפל אותו למבנים דו־ממדיים שרירותיים. במאמר שפורסם בכתב העת "Nature" הדגים רותמונד שלל צורות אפשריות: מרובעים, משולשים, סמיילי, המילה DNA, ואפילו מפת אמריקה – כולן מקופלות מאותו חוט של דנ"א, וכולן בגודל של כ־100 ננומטר (ננומטר: מיליארדית המטר) – פי אלף עד אלפיים פחות מעובייה של שערה אנושית.

בשנים שחלפו מאז השתכללה השיטה, וכיום ניתן לבנות מגוון גדול של גופים בעלי גיאומטריה מורכבת, משטחים עקומים ולא רציפים, קשרים, ואפילו אבני בניין המתחברות למבנים גדולים יותר – כולם מדנ"א אוריגמי. עמיתי מאוניברסיטת הרווארד, ד"ר שון דאגלס, הרחיב את השיטה לגופים תלת־ממדיים, והוסיף לה תוכנה ידידותית ביותר למשתמש. התוכנה, הנקראת Cadnano, היא חינמית

ניתן להוריד את התוכנה מהאתר cadnano.org, שבו תוכלו גם למצוא סרטוני הדרכה לשימוש בתוכנה. אני ממליץ לכם לנסות את כוחכם תחילה בגירסה 0.1 של התוכנה, ומשם להמשיך הלאה. למעוניינים, מדי קיץ מתקיימת תחרות הנקראת Biomod, ובמסגרתה מוזמנים סטודנטים ותלמידי תיכון להציג את תכנוניהם. פסגת התחרות היא הפנינג מקסים באוניברסיטת הרווארד. באתר התחרות biomod.net תוכלו למצוא פרטים על תכנונים מהתחרויות האחרונות ואת שמות הזוכים.

ומאפשרת לכל אחד לתכנן מבנים מדנ"א אוריגמי בתוך זמן קצר ביותר.

במקביל לשימוש בדנ"א לבניית מבנים מולקולריים, התברר בשנת 1994 כי מולקולות דנ"א יכולות לבצע חישובים מורכבים. לן אדלמן (מממציאי צופן ה־RSA) תיאר שימוש אלגנטי במולקולות דנ"א לפתרון בעיה המוכרת בשם "בעיית הסוכן הנוסע". הבעיה מציבה בפני הפותר רשת בעלת קודקודים ונתיבים המחברים ביניהם, והאתגר הוא למצוא נתיב רציף העובר בין כל הקודקודים מבלי לחזור על עצמו. כשמספר הקודקודים קטן הבעיה עשויה להיות פשוטה, אולם רמת הקושי עולה בהתמדה ככל שהרשתות גדלות. פתרון הבעיה מחייב חיפוש דרך כל האפיקים האפשריים עד למציאת הנתיב הרצוי. נכון להיום, אין אלגוריתם יעיל למציאת נתיב כזה.

אדלמן השתמש בתכונת התאמת הבסיסים של הדנ"א כדי לפתור את הבעיה: הוא קודד כל קודקוד וכל נתיב על־ידי חוט דנ"א, ו"חיפש" את הנתיב המבוקש מתוך כל הנתיבים האפשריים באמצעות חוט דנ"א, שרצף הבסיסים שלו השלים את רצפי כל הקודקודים והנתיבים בדרך, החל בקודקוד 0 ועד הקודקוד הסופי. מאחר שהחיפוש נעשה במקביל, כאשר כל הנתיבים נמצאים בתמיסת דנ"א במבחנה, ארך החיפוש זמן קצר ביותר. מאז הדגים אדלמן את יתרונו של הדנ"א בפתרון בעיית הסוכן הנוסע, נעשה שימוש בדנ"א כדי לפתור בעיות מורכבות דומות.

כשהמחשב נכנס לתוך הגוף

למרות זאת, ברור כי הפוטנציאל האמיתי של חישוב מולקולרי בא לידי ביטוי כאשר "מחשב" דנ"א מתקיים בתוך מערכת ביולוגית, קורא ממנה וכותב ישירות אליה. פריצת הדרך העולמית בתחום זה נעשתה במכון ויצמן, על־ידי צמד החוקרים קובי בננסון ואהוד שפירו. בעבודה מבריקה משנת 2004 בנו השניים מחשב ניתן לתכנות העשוי ממולקולות דנ"א, שמסוגל לשלוט באורח לוגי על ביטוי גנים בתגובה לחתימה גנטית מסוימת. מחשב כזה עשוי, למשל, לזהות מעבר מתא נורמלי לתא סרטני, ולהגיב בביטוי גנים המורים לתא להפעיל מוות מתוכנן. עבודה זו הוכיחה כי ניתן ליצור ממשק ישיר בין תהליך חישובי לבין מערכת ביולוגית כמו תא חי.

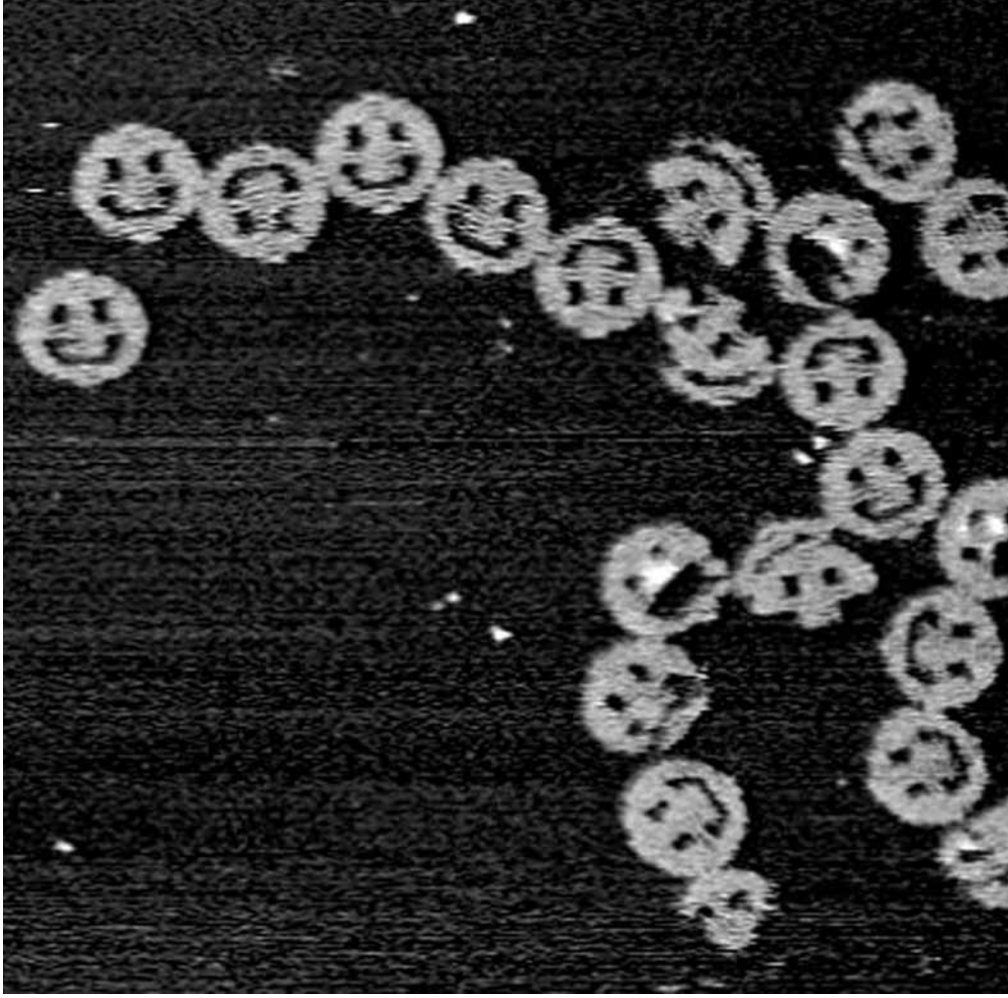
במהלך העשור האחרון, עם גילוי תכונות חדשות ופונקציות מלאכותיות חדשות שאפשר להעניק לדנ"א, התברר כי מולקולה רבגונית זו מספקת ערכת כלים לבניית מכונה או מחשב ננומטריים, שיהיו מסוגלים לקרוא מתוך ולכתוב אל תוך תאים ומולקולות. אחת הקבוצות של מולקולות הדנ"א המלאכותיות שתוארו נקראת "אפטמרים" (aptamers), והיא כוללת מולקולות המסוגלות לזהות מטרות נבחרות, כגון חלבון מסוים או פני שטח של תא מטרה, וכן אנזימי דנ"א (DNAzymes), המסוגלים לבצע פעולות כמו חיתוך והדבקה של מולקולות אחרות.

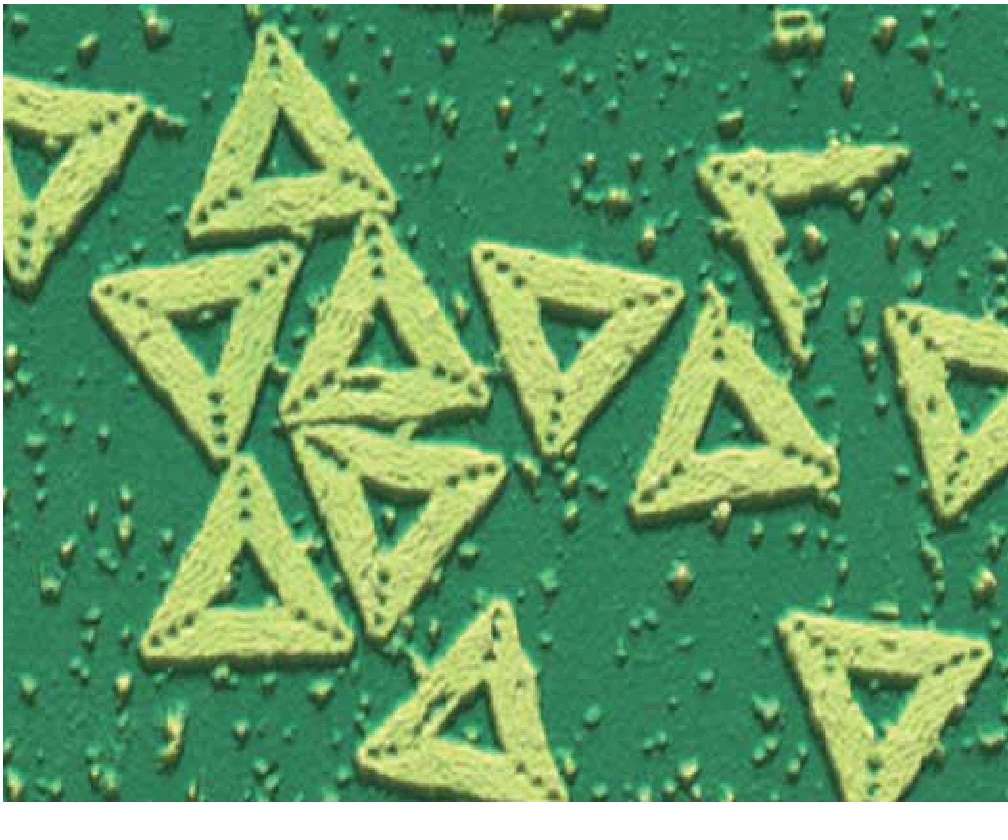
בהשראת עבודות אלה החלטנו "לחבר את הנקודות" ולתכנן מכונת דנ"א, שתיבנה בשיטת דנ"א אוריגמי ותנצל את כל הארסנל שהמולקולה המופלאה הזו יכולה לספק. המכונה שבנינו היא רובוט בגודל 50 ננומטר בערך, שניתן לטעון אותו במטען כלשהו – חלבונים, תרופות, ואפילו ננו־חלקיקים. את הרובוט אפשר לתכנת כך שיוכל לזהות צירוף כלשהו של תנאים (למשל, מולקולות המופיעות על פני השטח של תא סרטני).

כאשר הרובוט מזהה צירוף כזה הוא מגיב על־ידי שינוי מבני דרסטי: הוא נפתח לרווחה, תוך כדי חשיפת המטען שנטען בו מראש. המטען החשוף יכול עתה "להתקיף" את המטרה, בין אם היא תא, חיידק או נגיף. במובן זה המכונה היא רובוט אמיתי, המקשר בין חישה של סביבתו לבין תגובה מכנית באמצעות תהליך

>>

"בעתיד יוכל הרופא לגשת למגש מבחנות עם רובוטים ולבחור, תחילה, מבחנות המכילות את רכיבי התוכנה הדרושים לשם תכנות רובוטים שיזהו בדייקנות את סוג הסרטן שממנו סובל החולה, ולאחר מכן, מבחנות המכילות את המטען התרופתי המבוקש. בערבוב פשוט ייצור הרופא המטפל מערכת התפורה למחלה המסוימת ולחולה המסוים, שתתבסס על מיליארדי רובוטים זעירים שיפקחו על פעילות של כל חלקיק תרופה ויוודאו שהוא פועל אך ורק במקום ובזמן שהוא צריך לפעול"





דנ"א אוריגמי: משולשים, סמיילי,
שתיים מתוך שלל צורות אפשריות
שהדגים פול רותמונד (Rothemund)
במאמר שפורסם בכתב העת "Nature"

<< חישובי. למעשה, פעולת החישוב של הרובוט אנלוגית למנעול קומבינציה. במנעול קומבינציה יש מספר "חלונות" המציגים גלגלי ספרות, ורק כאשר כל חלון מציג את הספרה הנכונה, ייפתח המנעול. פעולה זו דומה גם לפעילותו של השער הלוגי הקרוי AND, מאבני הבניין היסודיות של כל מחשב מודרני: הוא נפתח אם, ורק אם, הוא מקבל את הקלט הנכון בכל ה"חלונות" שלו. לפיכך, רובוט הדנ"א מתפקד כמו שער לוגי מטיפוס AND.

בניסויי מעבדה שערכנו באוניברסיטאות הרווארד ובר־אילן, רובוטים שהוטענו בתרופות לסרטן היו מסוגלים להתקיף, באורח ברירני ביותר, רק את תאי המטרה, הואיל ורק הם ביטאו את הצירוף המורכב של אינדיקטורים מולקולריים שהרובוט תוכנת לזהות. כמו כן, רובוטים היו מסוגלים לאתר חלקיקים של חיידק, לאחוז בהם ולכוון אותם לתאים של מערכת החיסון, כאשר התוצאה הסופית הייתה הפעלת מערכת החיסון בצורה אופטימלית כנגד אותו חיידק. למותר לציין שמערכת החיסון שלנו עושה זאת היטב גם לבד. אולם ישנם מצבים בהם המערכת נחלשת זמנית או נפגמת, ולכן הרובוט עשוי להיות אמצעי יעיל לחזק אותה ולפצות על אובדן פעילות כלשהי.

כיום, במעבדתנו באוניברסיטת בר־אילן, אנו מתכננים ובונים גירסאות מתקדמות יותר של רובוטים כאלה, המסוגלים לתקשר ביניהם באמצעות מגע, או אף מרחוק, דרך מולקולות תקשורת מסיסות. בצורה זו הצלחנו לבנות ולהפעיל התנהגויות מתואמות במערכת מרובת רובוטים. דוגמאות להתנהגויות כאלה הן רובוטים המסוגלים לספור את עצמם, רובוטים המסוגלים לבצע פעולות חיבור וכפל תוך שימוש במולקולות ביולוגיות בתור "ביטים" של מידע דיגיטלי, ורובוטים המסוגלים להתחבר זה לזה וליצור מבנים מוגדרים. כל זאת, כשהרובוטים מוטענים בתרופות ומסוגלים לבקר את זמינותן (התרופה זמינה רק כאשר הרובוט פתוח, ולהפך) ופעילותן דרך התנהגויות מורכבות אלה. אנו עובדים על הגדרה של התנהגויות כאלה ודומות להן, ביניהן התנהגויות טבעיות של נחילי חרקים, באמצעות מולקולות דנ"א, ובעתיד נבחן האם התנהגויות אלה יעילות לצורך בקרה על פעילות תרופות.

מה היתרונות של הרובוט?

נושא הבקרה על פעילות תרופות הוא קריטי. ברשותנו נמצאות כיום תרופות אפקטיביות ביותר כנגד מגוון רחב של מחלות, אך בהיעדר יכולת מספקת להפעיל בקרה על תרופות אלה, נטילתן כרוכה בתופעות לוואי, ולעתים אף בהרעלה קשה, שמגבילה מאוד את השימוש בתרופות מסוימות, ולפיכך, את התועלת שניתן להפיק מהן.

תאי גופנו מבצעים מגוון מדהים של פעולות כימיות – בסופו של דבר, באמצעות שליטה על המיקום והעיתוי שבהם מולקולות יגיבו זו לזו. בניגוד משווע לכך, יכולתנו לקבוע זמן ואתר שבהם תפעל התרופה, מוגבלת ביותר. גם אם ניתן להביא תרופה למטרה באמצעות קשירתה לנוגדן, או לגרום לשחרור מבוקר שלה מחלקיק מהונדס, עדיין אין דרך, למשל, להפסיק את זמינותה באופן מיידי על־פי דרישה שלנו, או לגרום לכך שתרופות יוכלו לתקשר זו עם זו ולתאם את פעילותן, כך שלא ייווצרו התנגשויות שיגרמו לתופעות לוואי – פעולות שכאמור, נעשות באופן שגרתי על־ידי תאים בגופנו. מכונות דנ"א יכולות תיאורטית לספק דרישות כאלה.

על אף הפוטנציאל הטמון בהם, הדרך עדיין ארוכה עד לניצול רובוטי דנ"א אוריגמי לצורך בקרה על טיפול תרופתי בחולים. אחת הבעיות היא, שדנ"א מתפרק מהר מאוד בדם, וייתכן שלא יהיה לו מספיק זמן כדי לפעול. בעיה נוספת היא, שדנ"א בכמות הנדרשת עלול לעורר את פעילות המערכת החיסונית וליצור תגובה הרסנית.

אמנם, יש דרכים לעקוף בעיות כגון אלה באמצעות "טריקים" מולקולריים. למשל, לצפות את הרובוט בשכבה דקיקה של פולימר שימסך אותו, כך שהוא יוכל לעבור מתחת לרדאר של חיישניה המצוינים של מערכת החיסון, או לבנות רובוט מצורה סינתטית של דנ"א שעמידה בפני פירוק. בנוסף, אנחנו מפתחים טכניקה לבניית רובוטים "אישיים". כלומר, לכל אדם ייבנה רובוט שעשוי מהדנ"א שלו עצמו, כך שברגע שהוא יופעל, המערכת החיסונית תזהה אותו כ"עצמי" ולא תתקוף אותו. שיטות כאלה ואחרות מעסיקות כרגע מספר חוקרי דנ"א אוריגמי בעולם האקדמי.

אם מאמצים אלה יוכתרו בהצלחה, תהיה התוצאה פיתוח טכנולוגיה חדשנית, שתאפשר לנו לחשוב מחדש על תרופות ועל אופן השימוש בהן. בעתיד יוכל הרופא לגשת למגש מבחנות עם רובוטים ולבחור, תחילה, מבחנות המכילות את רכיבי התוכנה הדרושים לשם תכנות רובוטים שיזהו בדייקנות את סוג הסרטן שממנו סובל החולה, ולאחר מכן, מבחנות המכילות את המטען התרופתי המבוקש. בערבוב פשוט ייצור הרופא המטפל מערכת התפורה למחלה המסוימת ולחולה המסוים, שתתבסס על מיליארדי רובוטים זעירים שיפקחו על פעילות של כל חלקיק תרופה ויוודאו שהוא פועל אך ורק במקום ובזמן שהוא צריך לפעול. ייתכן שבעתיד תכנות מולקולרי ייכנס לתכנית הלימודים של הפקולטות לרפואה, ובמסגרתו ילמדו הסטודנטים הרכבה ותכנות של מתקנים רפואיים ורובוטים מדנ"א אוריגמי.

ימים (ואני מאמין שלא רבים מדי) יגידו, האם ישאו קיפולי דנ"א את הרפואה אל הדור הבא שלה.

איריס ערבות

איך המבנה הזה משפיע עליך?



כאשר אנחנו עוברים בחיי היומיום מול בניינים, שהאדריכלים שתכננו אותם התייחסו לכל פרט ופרט בעיצובם, אנחנו בקושי מזכים אותם במבט לפני שנמשיך בדרכנו. פרופ' איריס ערבות מנסה להסביר כיצד בני אדם חווים ארכיטקטורה גם בדרך אגב, ואיך פעלו אדריכלים לאורך ההיסטוריה כדי ללכוד את חושינו ותשומת לבנו



הקולוסיאום, רומא / צילום: גטי אימג'ס

>> **ולטר בנימין**, החוקר ומבקר התרבות היהודי־גרמני, כתב בחיבורו הנודע **"יצירת האמנות בעידן השעתוק הטכני"**:

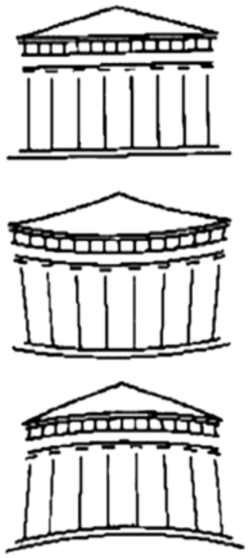
"קליטתם של בניינים מתרחשת בשני אופנים: דרך שימושם ודרך תפיסתם. או מוטב לומר: מישושית וחזותית. לא נשכיל להבין קליטה מעין זו כל עוד נדמה אותה לעצמנו במתכונתה של הקליטה המתרכזת, כדרכם של תיירים לנוכח בניינים מפורסמים [...] הקליטה המישושית אינה מתרחשת על דרך תשומת הלב, אלא על דרך ההרגל. לגבי הארכיטקטורה דרך שנייה זו, המבוססת על ההרגל, אף קובעת במידה רבה את הקליטה החזותית. אף קליטה זו מתרחשת במקורה לא תוך תשומת לב מאומצת, אלא כלאחר יד. להתרגל יכול גם מי שדעתו מוסחת".

הקביעה הזאת של בנימין צריכה להטריד כל אדריכל. היא עולה בקנה אחד עם ההתנסות היומיומית בסביבה הבנויה – שהרי איננו עוצרים ליד כל בניין ומתפעמים כדרך התיירים, שגם הם, עם כל תשוקתם ללכוד את מכמני המקום, אינם מתעכבים בכל פינה. מנגד, בעבודת האדריכל ישנה תשומת לב והקפדה על עיצוב בניין כמכלול ועל פרטים מדויקים. אם אכן הארכיטקטורה נתפסת באופן אגבי על־ידי מי שדעתם מוסחת למטלות היומיום השוטפות, האם איכויות היצירה האדריכלית נועדו לאדריכלים ולאנשי מקצוע, או, במקרה הטוב, לתיירים בלבד? ואולי יש להקדיש משאבים לחינוך הציבור, כך שישנה את התייחסותו היומיומית לסביבה הבנויה ויפנה זמן ותשומת לב להתבוננות בבניינים? שתי השאלות זוכות למענה שלילי. למעשה, הן לא נועדו אלא לחדד את החשיבות שבהבחנתו של בנימין, שאכן מאתגרת את האדריכל והאדריכלית (כשליש מכלל אדריכלי העולם הן נשים, ובמדינות אירופיות אחדות – יותר ממחצית).

השאלות העולות מהבחנתו של בנימין נוגעות למרכיבים, ליחסים ולאופנים של התפיסה האגבית של הסביבה הבנויה, ובהמשך, לתכנון האדריכלי המושכל הלוקח בחשבון את התפיסה הזו. אולם, מה ידוע לנו על התפיסה האגבית הזאת?

למה חשוב שהבניין יהיה יפה?

השאלה כיצד נתפס הבניין בעיני המתבונן, העסיקה תמיד את המחשבה האדריכלית. יופי הוא אחד ממטרותיו המהותיות של המעשה האדריכלי (בתקופתנו יש המבקרים זאת בתוקף!). מסורת מערבית ארוכת ימים קישרה יופי עם חוקים של גדלים בני מדידה וראתה את המפתח למבנה היקום כולו במספרים: תנועת הכוכבים, המוזיקה והאדריכלות נטועות כולן במרווחים פרופורציוניים, המבוססים על התפיסה האסתטית־מתמטית של פיתגורס.



איור 1: סכמות אנטזיס למקדש דורי
למעלה: כפי שנתפס לאחר אנטזיס (יישור הפרספקטיבה)
באמצע: כפי שהיה נתפס ללא אנטזיס
למטה: סכמת תיקון האנטזיס

בצד גישה מטפיזית זו הייתה ליוונים גם הבנה, שהתפיסה החזותית האנושית מעוותת ועלולה שלא לראות את היופי האדריכלי הפיתגוראי בשל מגבלות העין האנושית. זו הסיבה לכך שהם דאגו לתיקונים אופטיים: בפרתנון, למשל, יש "יישור פרספקטיבה" – ביוונית, אנטזיס (Entasis). רצפת המקדש קמורה מעט ועובי העמודים אינו אחיד, במטרה לבטל את ההסתגרות של המרחב וליצור רושם הרמוני מושלם בעיני המתבונן, המגיע לאתר מכיוונים שונים ונע בו מצד לצד. כל מערך העלייה לאקרופוליס באתונה תוכנן תוך התחשבות בדרך המשתנה שבה מתגלים המבנים לעיני העולים למתחם. תיקונים אופטיים של עובי עמודים נמצאו כבר במצרים העתיקה, וגם בפנתאון ברומא הרצפה מקומרת קלות כדי להבטיח את תפיסתה כאופקית (איור 1).

במאה הראשונה לספירה כתב **ויטרוביוס** את **"עשרת הספרים על הארכיטקטורה"**, שסיכמו את הידע המקצועי של תקופתו והיו נטועים בהשקפת עולם פיתגוראית־אפלטונית. ה"ספרים", שהיו נר לרגלי האדריכלות המערבית במשך אלפיים שנה, מציגים משנה סדורה על פרופורציות של "האורדרים הקלסיים" (הסגנונות האדריכליים שהיו מקובלים ביוון וברומי העתיקות). ויטרוביוס היה מקור השראה לתיאורטיקנים בתחום האדריכלות בתקופת הרנסנס, ובהם לאונה בטיסטה אלברטי, פיירו דלה פרנצ'סקה, סבסטיאנו סרליו ואנדראה פלדיו: כולם רצו להבטיח את היופי האדריכלי באמצעות הפרופורציות וניסו להתחקות אחר סודן בשרידי העולם העתיק.

ואשר לתפיסה האנושית: במאה החמש־עשרה נפל דבר עם גילוי הפרספקטיבה הגיאומטרית על־ידי האדריכל **פיליפו ברונלסקי**. הפרספקטיבה יושמה בהרחבה ושימשה לייצוג התכנון האדריכלי ולעיצוב המבט אל הבניין או הכיכר, בדומה לאופן שבו עיצוב תפאורה של במה מתייחס לזווית הצפייה של צופי התיאטרון. כך, למשל, תכנן ג'ובאנו לורנצו ברניני את פיאצה סן־פייטרו בוותיקן,

בכוונה שתיראה רחבה יותר מנקודת המבט של מי שעומד מול הקתדרלה. גם כאן היה שימוש בידע על התפיסה האנושית, אך ההתערבות הייתה יותר בגדר "תיקון של המציאות" מאשר תיקון מגבלות העין, ויצרה תעתוע ומניפולציה כדי להשלות את המבקרים. המבט הסטטי ממקום מועדף הפך להיות נקודת המוצא לתפיסת היצירה האדריכלית מאז הרנסנס. גם אם היו יוצרים שהדגישו את התנועה ואת הזמן, בפרקטיקה המקצועית שלטה הפרספקטיבה הגיאומטרית עד לשכלול ההדמיה הממוחשבת בשנים האחרונות. בספריו של ויטרוביוס נמצא גם המקור למשוואת האחדות האדריכלית:

firmitas, utilitas, venustas – כלומר, יופי, יציבות, נוחות.

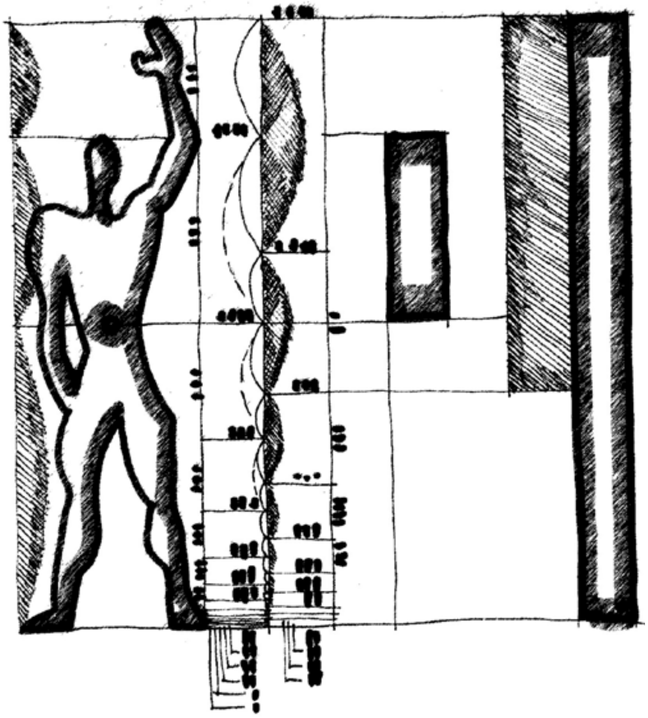
המשוואה הזו אמנם קיבלה פרשנויות רבות, אבל המשיכה לשמש מושא לדיון אדריכלי גם במחצית השנייה של המאה העשרים. חשוב לציין שעבור ויטרוביוס וממשיכיו, האחדות האדריכלית הבטיחה באמצעות הפרופורציות לא רק את היופי, אלא גם את היציבות המבנית ונוחות השימוש. ההנדסה האזרחית עוד לא הומצאה אז, וכך גם הנדסת האנוש, ולכן הבטחת התפיסה הנכונה על־ידי יצירת אובייקט אדריכלי יפה הייתה גם הבטחת יציבותו הקונסטרוקטיבית והתאמתו הפונקציונלית.

מאז המאה השמונה־עשרה החלה ההפרדה בין ההנדסה (על כל תחומיה) לבין האדריכלות: הנדסת קונסטרוקציות, הנדסת חומרים ועוד כוננו כתחומי ידע נפרדים. במקום להסתמך על הפרופורציות הקלסיות האחדותיות, עברו המהנדסים לחישובים סטטיים של מבנים. את מקומם של "האורדרים הקלסיים" בארכיטקטורה תפס המודרניזם על צורותיו החופשיות, ככל שאפשרה הטכנולוגיה.

קבוע מתמטי המסומן באות היוונית פי, המעסיק את המדע והאמנות כבר מאות בשנים, ויש אף הרואים בו מספר מיסטי. לפי ההשערות, נמצא יחס זה על־ידי אחד מתלמידיו של פיתגורס, ותיאורו מופיע בספרו של אוקלידס "יסודות". יחס הזהב נחשב באמנות לפרופורציה המושלמת והיפה ביותר.

סדרה מתמטית הקרויה על שם לאונרדו מפיזה, הידוע בכינוי "פיבונאצ'י", שתיאר אותה ב"ספר החשבונייה" בשנת 1202 . איבריה הראשונים של הסדרה הם 1 ו־1, וכל איבר אחר בה שווה לסכום שני קודמיו. היחס בין שני איברים עוקבים של סדרת פיבונאצ'י שואף ליחס הזהב: מספר אי־רציונלי שערכו ...1.61803398

אף על פי כן פיתח **לה קורבוזיה**, הדמות הבולטת ביותר באדריכלות המודרנית, שיטה משל עצמו לפרופורציות אדריכליות – "מידת הזהב" – שהתבססה על יחס (או חתך) הזהב, סדרת פיבונאצ'י וגוף האדם. בדומה לויטרוביוס, גם לה קורבוזיה ייחס לפרקטיקה של שימוש בפרופורציות משמעות מטפיזית (איור 2). עבור אחרים, ובמיוחד לנוכח השינויים הטכנולוגיים, מלחמות העולם והצורך בבנייה מואצת באירופה, איבד השימוש בשיטות מבוססות פרופורציות את ערכו. סופן של הפרופורציות



איור 2: Le Modulor – שיטת הפרופורציות של לה־קורבוזיה.

הקלסיות היה באירוע שנראה משעשע במבט לאחור: ב־18 ביוני 1957 נערכה הצבעה במכון המלכותי של האדריכלים הבריטים בלונדון. ברוב של 60 נגד 48 הוכרע כי שיטת הפרופורציות אינה משפרת את התכנון, וכי הוויתור עליה אינו מוביל לתכנון גרוע יותר. מה בדיוק היו אמות המידה של המצביעים למען תכנון טוב, והאם הן כללו היבטים תפיסתיים? לא ברור.

בין אם היה בכוחה של שיטת הפרופורציות לשפר את התכנון ובין אם לא, הנגיעה בתפיסה של אובייקטים אדריכליים דרך העיסוק ביופי ובפרופורציות התייחסה לתפיסה כאל אקט אסתטי ממוקד, ובוודאי לא אגבי. בניגוד לתפיסה היומיומית הרב־חושית, המתרחשת תוך כדי תנועה – תפיסה זו היא חזותית בלבד וממקמת את העין בנקודה מועדפת סטטית.

להחליף את הטעם האישי במדע

השינויים הטכנולוגיים והתפקידים החברתיים של הארכיטקטורה המודרניסטית הניבו אידיאולוגיה מקצועית, שניתקה את עצמה ממסורות קודמות של חשיבה, יצירה ובנייה. האידיאולוגיה הזו גם נפתחה לגישות מדעיות. **וולטר גרופיוס**, מייסד בית־הספר "הבאוהאוס לעיצוב ובנייה" (ששינה את החינוך האדריכלי במאה

<<

<< העשרים), קרא להחלפת "טעם" ו"תחושה", המאפיינים תפיסה סובייקטיבית, במונחים בעלי תוקף מדעי, המבוססים על ביולוגיה ופסיכולוגיה. באמצעותם ביקש ליצור "מפתח אופטי" כמכנה משותף אובייקטיבי המוסכם על הכול. ה"מפתח" הזה לא נמצא עד היום.

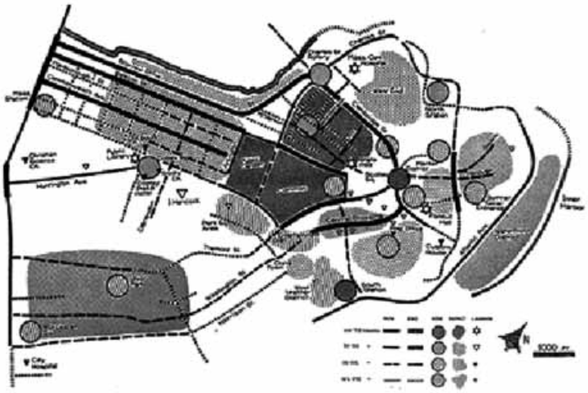
בדומה לתחומי ההנדסה, שמאז המאה השמונה־עשרה כוננו כדיסציפלינות עצמאיות ומדעיות בעלות יחסי גומלין עם הארכיטקטורה, הופיעו בשנות השישים של המאה הקודמת הפסיכולוגיה הסביבתית ומדעי אדם־סביבה. שני התחומים הללו התייחסו ישירות לנושא התפיסה בסביבות בנויות. כעשור מאוחר יותר חלה תפנית נוספת בחקר התפיסה בארכיטקטורה – בעקבות חדירתם של לימודי תרבות וגישות ביקורתיות לתוך השיח האדריכלי התיאורטי. בהשפעתם של אלה הופנה חקר התפיסה לכיוון חקר המשמעות. המטרה הייתה לפרש את האדריכלות כטקסט שתפיסתו זהה לקריאתו. ההתפתחויות הללו תרמו רבות להבנת התפיסה של הסביבה הבנויה והשפעתה על ההתנהגות האנושית, אולם, כפי שנראה, גם הן לא עסקו בתפיסה האגבית ישירות, אלא בעקיפין.

הפסיכולוגיה הסביבתית ומדעי אדם־סביבה התמקדו בחקר מאפייני הסביבה המועדפת על האוכלוסיות השונות. מחקר מהסוג הזה התבצע תוך שיתוף הציבור בעיצוב המרחב בו הוא חי, ובניסיון להבין איזו סביבה מסייעת להתמודדות טובה יותר עם דחק (stress). במישור התפיסה נחקרו הדימויים שמייצרת הסביבה, והדרך שבה נוצרות בראשנו מפות קוגניטיביות המאפשרות את ההתמצאות שלנו במרחב העירוני. במסגרת זו נבדק האופן שבו הסביבה הבנויה משתמשת ביעילות בתשומת הלב שלנו.

אחד המחקרים היותר ידועים בתחום המפות הקוגניטיביות פורסם בספר **"דמות העיר"** של המתכנן האמריקאי **קווין לינץ'**, אשר הגדיר חמישה משתנים בתפיסה של סביבה עירונית (איור 3). לינץ' טען כי כאשר אנחנו מגיעים לעיר כלשהי, נבנית אצלנו מפה מנטלית המצמצמת את גודש המאפיינים לסכמה בעלת המרכיבים הבאים: נקודות ציון, אזורים, מוקדי פעילות, אפיקי תנועה וגבולות. אנשים יוצרים לעצמם מפה קוגניטיבית תוך כדי התנסות בעיר, על־פי פעילויותיהם, סגנון חייהם, אופני התנועה שלהם ועוד. גם אם מפות של אנשים שונים שונות זו מזו, בכל זאת מרכיביהן העקרוניים הם זהים.

"דמות העיר" הפך לספר יסוד בלימודי התכנון האורבני. אף שרעיונותיו אומצו בהתלהבות רבה, לינץ' עצמו הצטער בערוב ימיו על כך שמחקרו לא הקיף היבטים נוספים, רגשיים וחושיים, מלבד אלה הקוגניטיביים.

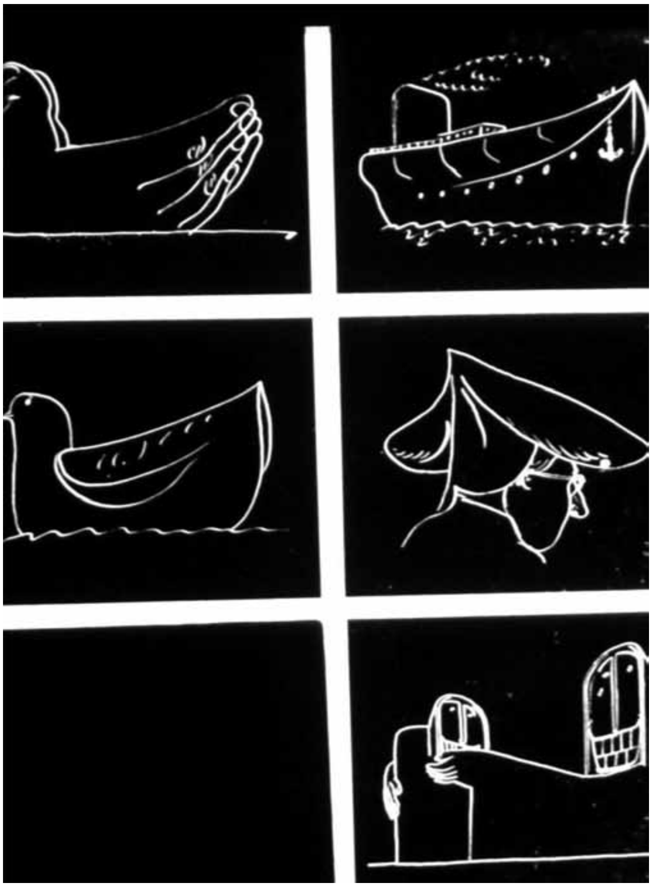
הסביבה הבנויה כטקסט פתוח לקריאה ולפענות, שהייתה אחד הביטויים ליישום האנלוגיה הלשונית בארכיטקטורה, חדרה לדיון האדריכלי בשנות השבעים של המאה הקודמת. מגמה זו החלה עם מחקר שנערך על עצם נשיאת המשמעות ואופן נשיאת המשמעות על־ידי אובייקטים אדריכליים. בהמשך פנו החוקרים לבחינת



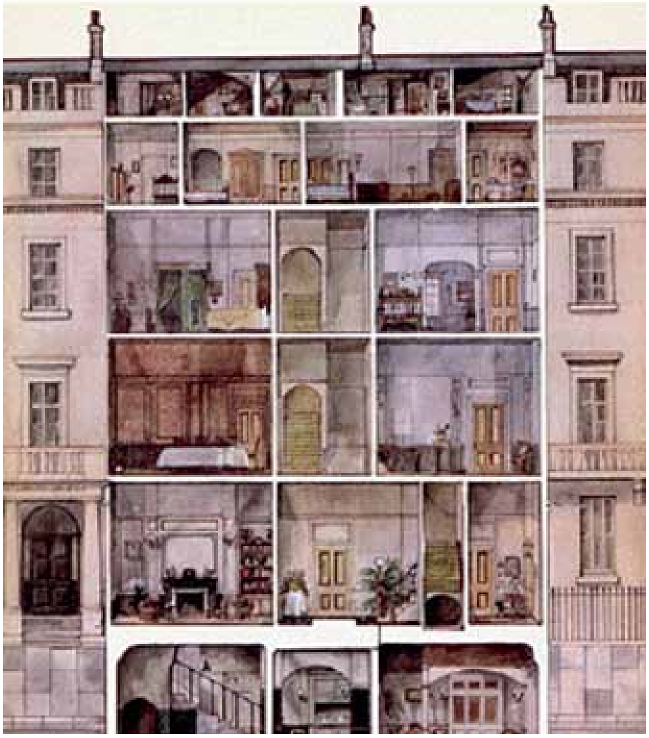
איור 3: מפה קוגניטיבית מספרו של לינץ', "דמות העיר": נקודות ציון, אזורים, מוקדי פעילות, גבולות ואפיקי תנועה.

סמלים וסימנים אדריכליים בהקשריהם המקומיים, תוך הארתם כמכשירים ומנגנונים להבטחת הסדר החברתי ושימור יחסי הכוח. כדוגמה למחקר "נאיבי" של נשיאת משמעות ניתן להביא את רישומיו של האדריכל **הלל שוקן** למטפורות הקשורות לכנסיית רונשם (Ronchamp) המפורסמת של לה קורבוזיה (איור 4). רישומים אלה מופיעים בספר של התיאורטיקן וההיסטוריון **צ'ארלס ג'נקס**, אשר טען שתפיסת האובייקט האדריכלי נעשית בהכרח במונחיו של אובייקט אחר, המוכר כבר למתבונן מניסיונו הקודם. כל צורה מוכרת של בניין – גג משולש, טחנת רוח, בניין משרדים – מניבה תפיסת "קלישאה". אם הצורה הבניינית חדשנית, התפיסה נעזרת ב"מטפורות יצירתיות". לפי ג'נקס, מטפורות בנייניות יהיו משותפות לקבוצות חברתיות־תרבותיות, אם כי ניתן לצפות להבדלים ניכרים בין קבוצות חברתיות ממקומות ומתקופות שונים.

גם עבודתו של לינץ' התייחסה ישירות לנשיאת משמעות: תהליך היצירה של מפות קוגניטיביות המתארות את העיר הניח סיווג של סמלים וסימנים, ולכן יעילותו תוארה כתלויה במידת הקריאות של הסימנים. המתכנן יכול ליצור סביבה קלה לתפיסה – קרי, לקריאה – על־ידי שימוש בסמלים קריאים ברמה התת־בניינית, הבניינית והעל־בניינית, או להקשות על התפיסה־קריאה באמצעות צורות הגורמות לבלבול, ולכן פוגעות בתחושת הביטחון והנוחות של המתבונן.



איור 4: הלל שוקן – מטפורות לכנסיית רונשם



איור 5: חתך של בניין מגורים בלונדון. המטבח והכניסה האחורית במפלס התת־קרקעי, חדרי משרתים זעירים בעליית הגג, וחדרים מרווחים לבני המעמדות הגבוהים בקומות הראשונות. / janeaustensworld.wordpress.com

בהשפעת כתבי **אנרי לפבר** (Lefebvre), ובעיקר בעקבות ספרו **"ייצור המרחב"**, הועתק הדגש של חקר התפיסה בארכיטקטורה להיבטים חברתיים־פוליטיים. לפבר הבחין בין מרחב נהגה, מרחב נתפס ומרחב נחווה, והפריד לחלוטין בין תפיסת האדריכל לתפיסה היומיומית של המשתמש. האדריכל הוגה את הסביבה הבנויה, והתושב או המשתמש תופס את הסביבה – כלומר, פועל בה. התושב עושה שימוש סמלי באובייקטים האדריכליים, וכסובייקט בעל דמיון ורגש הוא חווה אותם. אם נדמיין, למשל, בניין מגורים אופייני לעיר אירופית במאה התשע־עשרה, יהיה זה האדריכל מי שהגה את גרמי המדרגות הנפרדים לאדונים ולמשרתים, את החדרים גבוהי התקרה של דירות הפאר בקומה הראשונה, ואת חדרי המשרתות הצפופים בעליית הגג. השימוש בבניין איפשר ותמך בסדר החברתי הקיים. האדונים והמשרתים חוו אותו באופנים שונים מבחינה סובייקטיבית ואובייקטיבית כאחת: כל אחד ידע את מקומו, תרתי משמע (איור 5).

המחקר במדעי אדם־סביבה והמחקר הביקורתי תרמו להתמקדות בתפיסה היומיומית של הסביבה הבנויה: לא עוד אדריכלות כיצירת אמנות המבקשת את מלוא תשומת הלב, אלא כמרחב שבו מתרחשים החיים השגרתיים. יחד עם זאת, רבים מהמחקרים של אדם־סביבה שהדגישו את התפיסה החזותית בלבד, נערכו באמצעות ייצוגים (התבוננות בתמונות, הערכות מילוליות)ודרשו שיקול דעת והתייחסות מודעת. תרומתם של מחקרים אלה להבנת התפיסה מתוך הרגל, כלשונו של בנימין, היא עקיפה וחסרה בדרך־כלל את המרכיבים הרגשיים והחושיים. לעומתם, "הנחווה", במונחים של לפבר, חופף לתפיסה האגבית. המחקרים האדריכליים של "הנחווה" עדיין אינם מבהירים מהם מרכיבי התפיסה האגבית והמבנה שלה, אולי בגלל פנייתם המובהקת להיבטים חברתיים ופוליטיים של "ייצור המרחב".

את שורשי הרעיון של "המרחב הנחווה", כמו גם את חקר היומיום, ניתן למצוא אצל פילוסופים מהזרם הפנומנולוגי. עם זרם זה נמנה הפילוסוף הצרפתי **מוריס מרלו־פונטי**, אשר תרם תרומה מיוחדת לחקר התפיסה. הוא הציע גישה מנוגדת להפרדה הקארטזיאנית ששלטה בפסיכולוגיה של ימיו בין אובייקט לסובייקט: ההפרדה בין גוף לתודעה. לפי מרלו־פונטי, הסובייקט התופס/חווה אינו בגדר

<<

"האדריכל הפיני יוהני פלסמא מתאר את הראייה כהרחבה של חוש המישוש, את המישוש כתנאי לתפיסת עומק, ואת השמיעה כהכרחית לתפיסת החלל. הסביבה הבנויה, שאינה מחזירה מבט, מחזירה את הקול: עומקו של בור, הכיפה בתקרה, גובהה של קתדרלה. העומק, הגובה של החלל והזיכרון של המקום מציפים את האדם בלא שיפעיל שיקול דעת, מתוך שולי תודעתו, בזמן שעיקר תשומת לבו מופנית למטלותיו השגרתיות"

<< תודעה בלתי תלויה, נפרדת. הסובייקט מותנה על־ידי הווייתו כבעל גוף, ולכן מהווה חלק רציף של העולם. התניה הדדית זו של גוף ותודעה מַבנה את העולם כפי שהוא נתפס על־ידי בני האדם: לא התודעה האבסטרקטית בנוסח "אני חושב משמע אני קיים", אלא תודעה חווה ומעורבת שמתמצית במשפט "אני יכול/מסוגל משמע אני קיים". הפסיכולוג **ג'יימס גיבסון** וחוקר התודעה בן ימינו **אלווה נואה** הם דוגמאות בולטות לפנומנולוגים שהמשיכו את דרכו של מרלו־פונטי.

למשש באמצעות הראייה

בארכיטקטורה מתקיימת מסורת של חשיבה פנומנולוגית מאז שלהי שנות החמישים של המאה הקודמת. היא כוללת כתיבה מגוונת, שרק מיעוטה כוון לחקר התפיסה היומיומית. עם המעטים הללו נמנה האדריכל הפיני **יוהני פלסמא** (Pallasmaa), שכתב בהרחבה על התפיסה החושית של הארכיטקטורה, תוך יצירת סינסתזה בין הראייה הדומיננטית ליתר ששת החושים, ובין החושים לזיכרון ולדמיון. מלבד ראייה, שמיעה, מישוש, טעם וריח, הוא דיבר גם על תחושת השלד ותחושת השרירים. באחד מחיבוריו, **"עיני העור"**, הוא מתאר את הראייה כהרחבה של חוש המישוש, את המישוש כתנאי לתפיסת עומק, ואת השמיעה כהכרחית לתפיסת החלל. הסביבה הבנויה, שאינה מחזירה מבט, מחזירה את הקול: עומקו של בור, הכיפה בתקרה, גובהה של קתדרלה. על הקשר בין ראייה, ריח וזיכרון אומר פלסמא: **"הזיכרון המתמיד ביותר של מקום הוא ריחו [...] ריח מסוים מכניס אותנו בבלי דעת אל מרחב שנשכח לגמרי מהזיכרון של רשתית העין; הנחיריים מעירים תמונה נשכחת"**.

העומק, הגובה של החלל והזיכרון של המקום מציפים את האדם בלא שיפעיל שיקול דעת, מתוך שולי תודעתו, בזמן שעיקר תשומת לבו מופנית למטלותיו השגרתיות.

בניגוד לג'נקס, שהשתית את תפיסת הסביבה האדריכלית על השוואה מודעת לתמונה קודמת, הסינסתזה, על־פי פלסמא, מציעה הרכבה של המרחב הבנוי ושל משמעותו מתוך תפיסות חושיות חופפות שנמצאת בשולי התודעה. את המכלול הזה, על צורתו ומשמעותו, הוא מכנה "אטמוספרה" – אווירה.

גם אחרים, כגון האדריכל השווייצרי **פטר צומתור** והפילוסוף הגרמני **גרנוט במה** (Bohme), רואים ב"אווירה" את המרכיב הראשוני והמוביל של תפיסת הארכיטקטורה. ביומיום, "אווירה" נוצרת על־ידי אור, קול וריח הממלאים את החלל, ועל־ידי החומרים המגדירים את החלל והאובייקטים המוצבים בו. במאמר מוסגר ניתן לתהות כיצד הכתיבה הפנומנולוגית, בדיוק כמו המחקר הכמותי (למשל, זה של לינץ'), מתעלמת לחלוטין מנוכחותם של בני אדם, התנהגותם והופעתם. די לחשוב על האווירה בחלל של כיתת בית־ספר כשנערך בה שיעור, לעומת האווירה באותו מקום ביום הורים.

בהמשך למרכיבים היוצרים "אווירה" של חלל אדריכלי, החוקרים מדברים על מבנים ויחסים. במה, למשל, מבחין בין חלל מוגדר מכל צדדיו (רצפה, קירות, תקרה) לבין חלל המוגדר על־ידי רצפתו בלבד, כמו חלל הרחוב. אפשרות נוספת היא חלל האצור בנקודה, אפילו כשהיא נעה, כמו המרחב הנאסף סביב מטוס בשמים. תפיסת החלל בשלושת האופנים הללו אמורה להיות משותפת לכל בני האדם באשר הם, ללא תלות בהקשר תרבותי. ניתן להשוות גישה זו עם גישתו של האדריכל ומבקר האמנות הגרמני **גוטפריד זמפר** בן המאה התשע־עשרה. זמפר, כמו חוקרים אחרים בני זמנו, ביקש להגיע למקור של הדברים, גם אם באמצעות הדמיון בלבד. הוא

הציע ארבעה מרכיבים ממשיים־מטפוריים של הארכיטקטורה – התלולית (האדמה), הגג, האח והגדר – שכל אחד מהם הוא בעל משמעות קיומית בסיסית. בגדר, למשל, הוא מצא את ההגשמה של ההבחנה בין "אנחנו" ו"הם" ברמה ראשונית שקודמת לכל ביטוי סימבולי, ואילו באח הוא ראה את המוקד החברתי הראשון. בהקשר זה ניתן להצביע על בנייניו של האדריכל פרנק לויד רייט שנבנו סביב האח (איור 6), או אפילו על כפל המשמעות של המילה **מוקד** בשפה העברית.

חוקרים פנומנולוגים אחרים של ארכיטקטורה הזכירו גם הם את אווירת החלל הכללית, את הרצפה, הקיר והגג ואת ההבחנה בין פנים לחוץ. הם הוסיפו גם "עומק", "כיווניות" ו"שינוי כיוון".

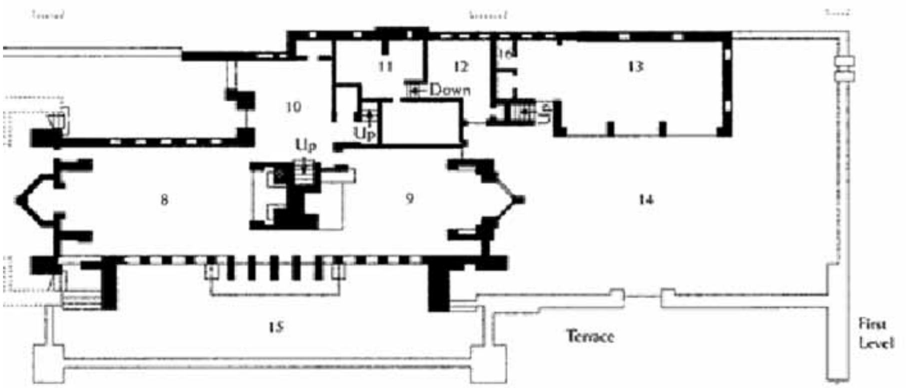
הארות בנושא התפיסה האגבית מגיעות גם מתחומים אחרים, והיה ראוי לסקור כאן מחקרים במדעי הקוגניציה ובפסיכולוגיה של האמנות. חלקם עוסקים דווקא בתשומת לב ממוקדת בבניינים, ומתוך ממצאיהם ניתן להשליך על היפוכם: מה אינו מושך את תשומת הלב.

בסיכומו של עניין, האתגר שהציב ולטר בנימין עדיין מצפה לחוקרי התפיסה האדריכלית – לאסוף את כל התובנות והממצאים משדות הידע השונים ולהציג תמונה ברורה של התפיסה האגבית של הארכיטקטורה. כאן, בניגוד לחקר תפיסה ממוקדת, לא ניתן לבקש ממשתתפי ניסוי או מסתם עוברי אורח לדווח על מה שנמצא בשולי תשומת לבם, כי עצם הבקשה תוציא את האגבי מאגביותו ותעביר את המוקד לשולי תשומת הלב.

ומה על היופי? מודל פסיכואנליטי אינטגרטיבי מהעשור האחרון (Hagman, 2005) מציג את חוויית היפה כמגשרת על הקוטביות בין העצמי לעולם, וכבעלת תפקיד שיקומי ומאחד של העצמי. כך שהיופי, גם אם נדחק ממעמדו הקדם־מודרני הרם, חייב למצוא את מקומו בתפיסה האגבית של הסביבה הבנויה.



איור 6: בית רובי של האדריכל פרנק לויד רייט.
http://www.wallchan.com/wallpaper/21305



איור 7: בית רובי של האדריכל פרנק לויד רייט: תכנית קומת הקרקע עם האח במרכז.
20/http://homer.ceat.okstate.edu

עוזי בן צבי

הילכו השניים יחדיו?

מדע ורוחניות נתפסו תמיד כשני תחומים שאין ולא יכול להיות ביניהם קשר, והניסיון להגדיר את הגבול המפריד ביניהם העסיק במרוצת השנים הן פילוסופים והן מדענים. בעשורים האחרונים, כאשר הגבולות בין מדע לבדיון ובין חומר ורוח מיטשטשים, עולה הצורך לאתגר את המתודה המדעית באופני חשיבה שמתאימים למערכות מורכבות, ושאינם בהכרח רציונליים

המדע המודרני צמח מתוך תרבות שלא עשתה הפרדה בין אמונה ותיאולוגיה לבין לימוד והכרת הטבע. התהליך של התפתחות וצמיחת הדיסציפלינה המדעית הצריך היפרדות מהדוֹגמה הדתית. בידול זה, בדומה לתהליך ההתבגרות של הפרט האנושי, נעשה בדרך של קונפליקט. הממסד הדתי לא ויתר בקלות, והתהליך כולו היה רצוף במאבקים מרים, שאת צלקותיהם אנו נושאים איתנו עד היום. תהליך ההיפרדות וההגדרה העצמית של המדע היה כרוך בשלילה כמעט אוטומטית של כל מה שנראה קשור לאמונה דתית. קונפליקט זה נמשך עד ימינו אלה, ומוצא את ביטויו העיקרי בוויכוח האינסופי סביב תורת האבולוציה.

המדע הפך מזמן לגוף העומד בזכות עצמו, ולמעשה, אף החליף את הדת בתור הדוגמה השלטת בכל הנוגע להסבר על "העולם החומרי", אך הקונפליקטים בין השניים עדיין נמשכים. הצורך לבדל את המדעי מה"לא־מדעי" קיים, והשפעתו ניכרת. גם הפרדה קלסית נוספת – זו בין הגוף לנפש – טבועה עמוק בתודעה הקולקטיבית וקשורה לצורך בבידול בין מדע לאמונה. אנשי הרוח חוששים מכך שהמחקר המדעי ה"יבש" יעקר את הממד הרוחני, והמדענים שומרים עצמם מכל משמר מפני "זיהום" החשיבה המדעית על־ידי צורות חשיבה לא מדויקות ומוכחות ו"לא רלוונטיות".

לכאורה, מדובר בשני עולמות מקבילים, או בשתי פרדיגמות, שיש הטוענים שלא ניתן, או שאין צורך, לחבר ביניהן. בהקשר זה מקובל להתייחס למושג "פרדיגמה" כפי שהוצג על־ידי תומאס קון, במשמעותו השלילית – כמנגנון שמסנן ודוחה את כל מה שאיננו מתאים. חשוב לראות גם את הצד השני של המטבע. אני מציע לראות את הפרדיגמה גם כמרכיב הכרחי ובלתי נפרד מהמערך המנטלי האנושי, שתפקידו לאפשר לנו לתפוס ולהבין מציאות מורכבת.

המנגנונים העומדים לרשותנו לצורך התפיסה וההבנה של המציאות החומרית מוגבלים מטבעם. הם מבוססים כולם, החל בחושים ועד למנגנוני ההבנה המורכבים ביותר, על ייצוג של המציאות ברמות שונות. כל ייצוג כזה הוא בהכרח רדוקציה ומבטא רק את אותו היבט של המציאות שמנגנון זה יכול לייצג.

מרבית הקשר שלנו עם המציאות החומרית מושג באופן ראשוני על־ידי איברי החישה שלנו. קשר זה, גם אם הוא נחווה כישיר ומיידי, הוא בדרך־כלל רחוק מלהיות כזה. כמעט תמיד מעורבת בו שרשרת של ייצוגים ראשוניים, שניוניים וכן הלאה, עד שהאות הראשוני מגיע ליעדו הסופי בתור מסר עצבי בר שימוש.

איברי החישה שלנו מוגבלים לטווח מצומצם למדי מתוך מגוון התופעות בעולם ה"אמיתי". כך, למשל, אנחנו מסוגלים לקלוט רק חלק זעיר מספקטרום הקרינה האלקטרומגנטית, ואנו עיוורים לגמרי לעוד מגוון של סוגי קרינה אחרים. אנחנו מתמודדים עם המגבלה הזו על־ידי יצירת כלי חישה מלאכותיים, המגדילים לאין שיעור את טווח התופעות שבהן אנו יכולים לצפות. כל אחד מכלי החישה האלה בנוי לקלוט סוג מסוים של אינפורמציה ולתרגם אותה לפלט, שאותו אנחנו יכולים לקלוט בחושינו. בעשרות השנים האחרונות, בעידן המחשב, הרחקנו לכת עוד יותר ופיתחנו גם כלים לעיבוד המסרים המגיעים מאותם מכשירי חישה מלאכותיים. תהליך זה, שהוא תוצר של התרבות האנושית, מקביל לתהליכים הטבעיים שבהם התפתחו, מתוך מנגנוני החישה והתגובה, הכלים הטבעיים לתפיסה, להבנה וללמידה. זוהי מעין חוליה נוספת, מלאכותית, בשרשרת הטבעית הארוכה של התפתחות הכלים הללו.

החוליות הראשונות באותה שרשרת טבעית של ייצוגי המציאות נוצרו במשך עשרות ומאות מיליוני שנים של אבולוציה. זהו התהליך של פענוח האותות המתקבלים מאיברי החישה, ועיבודם בחלקים המפותחים יותר של המוח. המבנה הבסיסי שלנו, שהתפתח לפני עשרות, ואף מאות, מיליוני שנים, מאפשר מסלולי קליטה של אותות הקשורים לצרכים ראשוניים, כמו הגנה מטורפים, חיפוש מזון, מין וכיוצא באלה, יחד עם מנגנוני תגובה מיידית ואוטומטית על אותות אלה. התנהגויות משוכללות ומורכבות יותר דורשות מסלולים



יוקיקו קיטאהרה, "מוחות"
Yukiko Kitahara, Cerebros / photo: mediateletipos - flickr

ארוכים, מפותלים ואף מסורבלים יותר, הכוללים מנגנונים מתווכים נוספים. הרבה לפני שהאדם למד ליצור את המנגנונים המתווכים המלאכותיים, התפתחו מנגנונים אלה, שחלקם "טבעיים" (גנטיים) וחלקם תלויי תרבות (ממטיים), הלוא הם תהליכי התפיסה, הלימוד, החשיבה וההבנה האנושיים.

להבדיל מהחלקים הפרימיטיביים המתוכנתים לתגובות מוגדרות מראש, כל המנגנונים הללו מהווים יחד כלי רב־שימושי, המסוגל להתאים את עצמו למגוון עצום של משימות שונות ומשונות, שהמין האנושי לא נדרש להן במהלך האבולוציה. זהו כלי שמסוגל להוציא לפועל משימות פיזיות, רגשיות או אינטלקטואליות, לפי הצורך, ואף להגיע בכל אחת מהן לרמת תפקוד וירטואוזית. הפוטנציאל של הכלי אמנם נראה כמעט אינסופי, אך משהותאם למשימה מסוימת, נפגמת יכולתו להתאים למשימות אחרות. הוא מאורגן במסלולים ייעודיים שאנו קוראים להם בשמות, כמו הרגלים, מושגים, דפוסים וכיוצא בזה, וברמת ארגון גבוהה יותר – בשמות כמו תפיסת עולם, נרטיב או פרדיגמה.

הנטייה להתארגן כך היא כנראה תכונה מולדת, אך המסלולים השונים הם, במידה רבה, תוצרי תרבות. היכולת לסטות מהמסלולים הקיימים, או אפילו ליצור מסלולים חדשים, לא נעלמת לגמרי, אך בדרך־כלל זה קורה רק כאשר אף אחד מהמסלולים הקיימים אינו "מספק את הסחורה", ולו גם באופן חלקי.

עולם המושגים שלנו אינו אוסף אקראי. הסמלים, הרעיונות, הדעות ואפילו העולם הרגשי מסודרים ומאורגנים על־ידי התודעה באופנים שונים, שלא תמיד אנו שמים לב אליהם (ואולי התודעה היא היא הסדר הזה..?). אנחנו נושאים איתנו מאגר נתונים ביולוגי ותרבותי בעל מערכת קשרים מסועפת, שכל חברה וכל פרט מוסיפים לו את האפיונים הייחודיים להם. מושג או רעיון חדשים ה"מבקשים להצטרף לחבורה", חייבים לעבור "מבחן התאמה". אם הם לא מתאימים למה שכבר נמצא במאגר, יקשה עליהם עד מאוד להצטרף אליו.

כך, למשל, אם מישהו יציג בפנינו מילה חדשה בשפת אמנו, בדרך־כלל לא תהיה לנו כל בעיה לקלוט וללמוד את הגייתה, להבחין באופן חד־משמעי בינה לבין מילים אחרות הדומות לה, וגם להבין את משמעותה. לעומת זאת, אם יציגו בפנינו מילה בסינית (בהנחה שטרם למדנו שפה זו), נזדקק למאמץ ניכר על־מנת ללמוד את המבנה הצלילי שלה, יקשה עלינו מאוד להבדיל בינה לבין מילים דומות לה, ובמקרים רבים נזדקק גם להסברים ארוכים על משמעות המילה.

בניגוד לקונוטציות החברתיות־אנושיות שהובאו כאן, מבחן ההתאמה הזה אינו נובע מסנוביזם או משנאת זרים, אלא מסיבות פרקטיות. אנחנו מתקשים להבחין בכל דבר שהוא חדש לגמרי, ובדרך־כלל מסוגלים להבחין בו ולהגדירו דרך המושגים הישנים, דרך משהו דומה שכבר קיים בתוכנו. קביעה זו מעלה את השאלה, איך בכל זאת משהו יכול להתחדש. שאלה זו רחבה יותר מהנושא שלפנינו, אך נתייחס אליה בעקיפין בהמשך.

אפשר לתאר את התודעה כמכשיר הדמיה. היא מקבלת אוסף של נתונים שאין לנו יכולת להבין את משמעותם באופן ישיר, ומציגה אותם בפנינו לפי עקרונות מובנים שנובעים מהגדרת הצרכים וממגבלות המכשיר. היא כוללת בתוכה מספר מסלולים ייעודיים, שאת חלקם אפשר לתאר כפרדיגמות. אנחנו משתמשים בפרדיגמות שונות, או בטכנולוגיות שונות של הדמיה, שכל אחת מהן מסוגלת לחשוף אספקט מסוים של המציאות. שימוש מקביל במכשירים השונים יכול לספק לצופה תמונה שלמה יותר של המציאות. אפשר להשתמש בדוגמה של שילוב בין MRI ל־EEG בחקר המוח – האחד מדויק להפליא במרחב, אך הרבה פחות מדויק בזמן, והשני בדיוק להפך. השימוש בשניהם במקביל מביא להעצמת הידע וההבנה של תפקוד המוח.

כשאנחנו מנסים להבין את העולם – את עצמנו ואת הסובב אותנו, אנחנו משתמשים בכמה "מכשירי הדמיה" שהתפתחו במהלך האבולוציה הביולוגית והתרבותית שלנו. כל "מכשיר" כזה מבוסס על מנגנוני תפיסה וחשיבה מולדים, ועל מערכת של מושגים ודעות שנרכשו תרבותית. חלק מהמכשירים בסיסיים ביותר, אך אותם מכשירים בסיסיים יכולים להצטרף יחד למכשיר מורכב יותר. למורכבים שביניהם אנחנו קוראים בשמות כמו "מתודולוגיה", "דיסציפלינה", "פרדיגמה", "נרטיב" וכדומה. הפרדיגמה ה"רוחנית" (שלא אנסה להגדיר אותה כאן) והפרדיגמה המדעית אינן אלא שניים מתוך אותם כלים – מכשירי הדמיה של המציאות, שמאפשרים לנו הצצה על אספקטים מסוימים שלה. כל דיבור על סתירה ביניהן נובע מהנטייה לאמץ פרדיגמה אחת ולהאמין, שהיא אמורה להציג לבדה את התמונה המלאה.

>>

>> מאחר שאנחנו מניחים שהעולם כולו מתנהל על־פי מערכת אחת ויחידה של חוקים, יכולות הפרדיגמות הסותרות לכאורה להוות נקודת מוצא להרחבת הידע וההבנה שלנו, גם על עצמנו וגם על העולם הסובב אותנו. כל פרדיגמה טומנת בחובה היבטים מסוימים של המציאות ומערכת כללים המקשרת ביניהם, ומתייחסת רק לאותן תופעות שהיא בנויה להתייחס אליהן. הניסיון לבחון סוג אחד של תופעות בעזרת הכללים של פרדיגמה אחרת יכול להיות כלי מחקרי רב־עוצמה. דוגמה לאפשרות מעין זו היא החשיבה האנלוגית, המשווה בין שתי תופעות שלכאורה אין ביניהן כל קשר. מנגנון מחשבה זה, המסוגל לדלג מעל מכשולים תפיסתיים, הביא לפריצות דרך רבות במהלך ההיסטוריה של המחשבה, אם כי לא אחת "דילוגים" מעין אלה עקפו גם את מנגנוני הבקרה וגרמו לטעויות מביכות.

המדע שואף לתת תמונה מלאה ככל האפשר של המציאות. מבחינה זו, אין תחום או תופעה שאינם אובייקט פוטנציאלי לחקירה מדעית. המתודולוגיה המדעית היא כלי משוכלל שהתפתח בדיוק לצורך זה – לאפשר לנו בדיקה "אובייקטיבית" של התופעות שלפנינו. השיטה המדעית בטוהרתה מאפשרת לבסס קשרים סיבתיים בין תופעות שונות ולהפוך אוסף של נתונים למבנה בעל משמעות.

בתיאור האידיאלי הזה יש בעיה כפולה: האחת, אופי המדען, שלא פעם איננו באמת אובייקטיבי כפי שהיינו רוצים להאמין. השנייה, שהמתודולוגיה המדעית מוגבלת מטבעה, גם משום שהיא מבוססת באופן בלעדי על חשיבה רציונלית, וגם מכיוון שבהיותה בנויה להתמודד עם קשרים סיבתיים־ליניאריים, היא מתקשה לבחון תופעות שאינן כאלה מטבען.

מדעי החיים (ואולי כלל מדעי הטבע) עומדים היום בפני אתגר מסוג חדש. יותר ויותר מערכות מורכבות מתגלות כלא־ליניאריות במהותן, ויש קושי לחקור אותן בכלים ובמתודולוגיה הקיימים. לכאורה, אין בכך חדש. כבר בתחילת העידן המודרני, עם הפרדת המדע מהאמונה, נשאר "עולם הרוח" מחוץ לתחום עיסוקו של המדע. אך במקרה זה ההפרדה בין חומר לרוח נתפסה כמובנת מאליה, כמעט כגזירת גורל, ולכן היא לא אִתגרה את המדע. המצב השתנה כשהמדע התחיל לפגוש את גבולות היכולת של כלי המחשבה והחקירה גם בטריטוריה שלו עצמו, ועל כך קשה יותר לעבור לסדר היום.

יותר ויותר אנחנו נאלצים להכיר בעובדה שהתנהגות אי־רציונלית איננה רק חולשה אנושית, אלא חלק מהאופן שבו הטבע פועל. תופעות שלא ניתן לתת להן הסברים סיבתיים־לינאריים מתגלות ודורשות הסברים מסוג אחר. זה קורה בתחומים כמו התפתחות עוברית, מערכות אקולוגיות ואפילו גנטיקה, שככל שמעמיקים בהם, הם נראים פחות ופחות מובנים.

אפשר להסתפק בהסברים שהמדע בצורתו הנוכחית מסוגל לספק, ולקוות שעם עוד קצת מאמץ יימצאו הסברים מספקים לכל

"במקומות שבהם החשיבה הרציונלית והאובייקטיבית מפסיקה להיות רלוונטית, כנראה שלא יהיה מנוס מלחפש כלים אחרים להכרת המציאות. כלים כאלה כבר נמצאים בהישג ידנו, והשאלה היא כיצד ניתן לשלבם בתוך הדיסציפלינה המדעית. המסורות הרוחניות יכולות להציע מגוון של שיטות חקירה ולימוד שהתפתחו במשך דורות רבים, אך השימוש בהן בעייתי"

בעיה שתתעורר, אך אפשר גם לשאוף לשינוי ולאבולוציה של המתודולוגיה עצמה, שיאפשרו לחקירה ולחשיבה המדעיות מרחב פעולה גדול יותר. כבר היו דברים מעולם. המתודולוגיה המדעית אימצה את ההוכחה הנסיבתית־סטטיסטית כהליך לגיטימי לצד ההוכחה הסיבתית, וזאת מבלי שהזדעזעו אמות הסיפים.

עם זאת, נראה שהשינוי המתבקש עכשיו הוא הרבה יותר דרמטי. כנראה שלא מדובר כאן בעוד פרדיגמה מהסוג שתיאר תומאס קון, אחת מני רבות שבאו והלכו במהלך ההיסטוריה של המדע, אלא במטא־פרדיגמה. ייתכן שאנו עומדים בפני הצורך לנסח מחדש את המסגרת המתודולוגית עצמה – את כללי המשחק שבעזרתם ועל־פיהם אנחנו לומדים להכיר את המציאות. שינוי כזה מאיים להתנגש במוסכמות הקיימות ולערער את הדרך הבדוקה והמוכרת לאישוש טענות מדעיות.

לא יהיה זה נבון לנסות לנבא כאן איזה מין שינוי יאפשר, אם בכלל, את הפריצה של הגבולות הללו, אך לא אתפלא אם הדבר יהיה כרוך בצורה זו או אחרת בניסוח מחדש של היחס בין הצופה לנצפה – בין החוקר לאובייקט החקירה.

בנקודה זו ניתן אולי לעזוב לרגע את עולם המדע ולהיעזר בצורות חשיבה ותפיסה המשויכות בדרך־כלל לתחום הרוח. כיוונים אפשריים ניתן למצוא בהתנסות האינטימית של המדיטציה וגם במדעי הרוח הפורמליים. בדיסציפלינות אלה עולה שוב ושוב השאלה, מהו היחס בין הצופה לתופעה הנצפית. ברמה הפשוטה והראשונית ביותר השאלה היא, כיצד יכול אדם להכיר את עצמו – האם וכיצד יכול הלומד ללמוד את עצמו, ובכלל זה גם את עצם תהליך הלמידה.

הדבר מזכיר את אחד מסיפורי הברון מינכהאוזן: יום אחד נקלע הברון לבוץ טובעני והחל לשקוע. מאחר שלא היה בסביבה איש

שיוכל להיעזר בו, נאלץ הברון להסתדר בכוחות עצמו ולמשוך את עצמו בצמתו מן הבוץ... הסיפור אמנם מופרך, אך קשה שלא להתרשם מהדמיון בין בעייתו של הברון לדילמות שהמדע עומד בפניהן היום. וריאציות על השאלה מי מושך את מי, מה הגורם ומהי התוצאה, עולות במדעי החיים שוב ושוב ככל שהראייה המערכתית־רשתית תופסת את מקומה של תפיסת העולם הליניארית.

נראה שמעללי הברון דומים למדי למה שמנסות לעשות החקירה והלמידה האינטרוספקטיביות. לכאורה, יש סתירה לוגית בעצם הניסיון של הצופה לצפות בעצמו, אך הניסיון מראה שחקירה כזו היא בכל זאת אפשרית. במדעי הרוח זוהי שיטת חקירה מקובלת שאינה נדרשת לאישוש מדיסציפלינות אחרות – אנשים כמו פרויד או ויליאם ג'יימס כתבו מה שכתבו, וקוראיהם מוזמנים עד היום לבדוק את האמירות הללו, בראש ובראשונה בדרך של הסתכלות פנימה, על עצמם. גם במדעי החברה נעשה שימוש נרחב באינטרוספקציה, אם כי בדרך־כלל נדרש לתובנות האינטרוספקטיביות אישוש מדיסציפלינה מחקרית אחרת, שהיא לעתים קרובות נסיבתית (סטטיסטית), ולא סיבתית.

במדעי הטבע המקום והתפקיד של האינטרוספקציה הרבה פחות מובנים מאליהם – בראש ובראשונה משום שנושא החקירה איננו האדם, אלא אובייקט חיצוני כלשהו. אנו נוגעים כאן בהנחה שנמצאת בלב־לבה של המתודולוגיה המדעית – האובייקטיביות. לא מדובר רק בהכרה שכל מדען הוא אדם הנגוע בהטיות כאלה או אחרות, אלא בהבנה שעצם רעיון ההפרדה בין הצופה לנצפה איננו אלא פרדיגמה – כלי שימושי ויעיל בשלבים שונים של תהליך הלימוד והכרת המציאות, אך עדיין כלי מוגבל מעצם טבעו. האובייקטיביות באה לידי ביטוי בעיקר ברמה הייצוגית של המדע – בשיח המדעי ובאופן שבו נכתבים הפרסומים המדעיים, אך המדען החוקר עובד לרוב בצורה קצת שונה. הרעיון או התובנה החדשים כמעט לעולם אינם יכולים לנבוע באופן ישיר ובלעדי מתוך גוף הידע הקיים. החוקר צריך לחפש אותם במקום אחר. הוא לעולם אינו פועל בחלל ריק, ולכל מקום הוא לוקח את עצמו.

ככל שהשאלה פחות מובנת מאליה החוקר נדרש להפעיל יותר תפקודים מחשבתיים, ולא אחת גם רגשיים. ההזדהות עם הבעיה, ההתחברות איתה ועוד שלל תיאורים מעין אלה מצביעים על כך, שבדרך לפתרון האובייקטיביות היא ממנו והלאה. מדובר בתהליך שבדרך־כלל איננו מודע, לפחות לא באופן מלא. המחשבה הסיבתית מפנה את מקומה לסוג אחר של חשיבה, שאיננו כבול למגבלות של ההקשרים הסיבתיים הרגילים. החוקר יכול לשוטט בין אסוציאציות שונות, פנימיות וחיצוניות (אם בכלל ניתן להפריד...) ולקבל מהן את ההשראה לתובנה החדשה. במילים אחרות, היווצרות התובנה הראשונית קשורה לא פעם לתהליך פנימי של החוקר, שמסוגל להתחבר לשאלה שעל הפרק ולעקוף את מגבלות החשיבה הרציונלית.

המעבר בין התובנה האינטרוספקטיבית לדיסציפלינה המדעית הוא בהכרח תהליך של רדוקציה. התובנה עוברת לטיפול ולהגדרה בכלים של החשיבה הרציונלית ולפי הכללים שלה, ולאישוש בדיסציפלינות המדעיות הרגילות. רק לאחר שהיא הוגדרה ונמצאה תואמת את הידע הקיים, היא יכולה להיחשב לחלק מגוף הידע הזה. בתהליך כזה נשאר מהתובנה הראשונית רק מה שניתן להביע במסגרת הכללים של המתודולוגיה המדעית. במילים אחרות, המתודולוגיה, שייעודה העיקרי הוא לאפשר את הרחבת הידע, הופכת למחסום המסנן באופן שיטתי חלק מן התובנות, ומן הסתם, אף חלק של המציאות עצמה. הפער בין "הרוח החופשית" לבין ההגדרות והניסוחים השונים הוא כנראה בלתי נמנע, אך האתגר של השילוב בין שניהם הוא כנראה לב־לבה של כל פעילות יצירתית.

המדען היצירתי אינו מגביל את עצמו לחשיבה רציונלית ופורמלית, אך המדע כדיסציפלינה אינו יכול לחרוג מהכללים המגדירים אותו. הבעיה נוצרת כשמתברר כי הכללים אינם יכולים להכיל את המציאות כפי שהיא מתגלה לעינינו. הקונפליקט הוא קריטי. מצד אחד, שבירת הכללים עלולה ליצור תוהו ובוהו, ומצד שני, לאורך זמן המדע לא יכול להרשות לעצמו שלא להתייחס לאותן תצפיות שאינן עולות בקנה אחד עם המתודולוגיה שלו.

במקומות שבהם החשיבה הרציונלית והאובייקטיבית מפסיקה להיות רלוונטית, כנראה שלא יהיה מנוס מלחפש כלים אחרים להכרת המציאות. כלים כאלה כבר נמצאים בהישג ידנו, והשאלה היא האם וכיצד ניתן לשלבם בתוך הדיסציפלינה המדעית. המסורות הרוחניות יכולות להציע מגוון של שיטות חקירה ולימוד שהתפתחו במשך דורות רבים, אך השימוש בהן כחלק מן המדע הפורמלי בעייתי עד מאוד. האתגר כפול: גם פסיכולוגי וגם רעיוני. ברמה הפסיכולוגית, קשה מאוד לראות את עולם המדע נפתח לשיטות "מפוקפקות" ומוותר על הביטחון שהשיטה הקיימת נותנת להולכים בה. ברמה הרעיונית, אימוץ של שיטות חקירה מעין אלה עלול לערער את מנגנוני הבדיקה והאישוש שהם מעמודי התווך של המדע, ושאחראים במידה רבה לחוסנו.

כשאנו מנסים להרחיב את ההבנה שלנו על העולם, גם ההגדרה של מה קביל ומה לא קביל חייבת להתפתח ולהשתנות. זהו שינוי מעמיק ומהפכני שיחייב יצירת פרוצדורות אישוש שיתאימו לשיטות חקירה חדשות, ושיהיו לא פחות אמינות מהפרוצדורות הנהוגות כיום. כאמור, לא יהיה זה נבון לנסות לנבא לאן תתפתח המתודולוגיה המדעית, אך האתגר קיים ונוכח, ואין ספק שבדרך זו או אחרת המדע יהיה חייב להיענות לו ולהתמודד עימו.

עוזי בן צבי הוא מתכנן גנים במקצועו ובעיסוקו, מדען בחינוכו ובהשכלתו הפורמלית, בעל תואר שלישי (DEA) בפילוסופיה. מתעניין ולומד את הממשק בין מדעי החיים לקוגניציה



יואב שביט

המטוטלת

יואב שביט מציע מודל פשוט לתיאור היחסים פרט־חברה לאורך ההיסטוריה באמצעות המדיום התקשורתי. איך רשת האינטרנט בולמת את תהליך ההפרטה של חיינו ומחדשת את ההוויה המשותפת לבני האדם

תרבות היא במידה רבה תהליך של הפרדה ואיחוי. שיאו הנוכחי של התהליך ניתן לתיאור כ**אדם מול מסך. האדם מול המסך** הוא האינדיבידואל האידיאלי מבחינה קפיטליסטית; הוא אמור לספק את כל מחסורו ומאווייו באמצעות צריכה. אלא שברגע שבמסך (ש**מול האדם מול מסך**) פועלת רשת חברתית, תהליך ההפרדה נבלם; **האדם מול המסך** מגלה שהוא חלק מקולקטיב, שיש עוד הרבה אנשים כמוהו, במצבו – ושזה מצב מתסכל. את הרגע הזה, שבו הפרט תופס את עצמו כחלק מחברה או מקולקטיב, נדמה שההיפר־קפיטליזם יתקשה לשאת.

ברצוני להציע תיאור מפורט יותר של תהליכי ההפרדה והאיחוי. האינדיבידואל, התוצר הסופי של תהליך ההפרדה החברתית, אמנם ניצב בנפרד מהעולם, אבל תופס את העולם כולו ככדור שעליו חיים פרטים. זו התפיסה המאוחדת ביותר של עצמה שהייתה לאנושות אי־פעם. לכן נכון להגיד שהתהליך הכללי של ההתפתחות האנושית יוצר בו־בזמן הפרדה גדולה יותר ואיחוד גדול יותר, והקטבים האלה מאפשרים האחד את השני. ככל שבסיס התפיסה עמוק יותר, כך היא אוניברסלית יותר ומאפשרת לאחד בתוכה יותר בני אדם. הנקודה הדמיונית אליה שואף התהליך היא אל עולם שמורכב כולו מפרטים, שתופסים את העולם כמקום אחד שבו קיימים פרטים שונים. זהו תיאור כללי של התהליך. אם מסתפקים בו אפשר לטעות ולראות את הנקודה שבה אנחנו נמצאים היום כסינגולרית, כיחידה מסוגה, כשלמעשה, תמונה מפורטת יותר של התהליך תחשוף שלאורך כל ההיסטוריה והפרהיסטוריה התרחשו תנודות עקביות ושינויי כיוון מקבילים.

מכיוון שאנחנו תופסים את עצמנו באמצעות תקשורת, ומאחר שהשינויים שמתרחשים היום כרוכים בעלייתו של מדיום חדש, האמצעי שבעזרתו אני מציע לפרק ולהבין את התהליך הוא המדיום; הכלי שבאמצעותו אנחנו משקפים את עצמנו, תופסים את עצמנו ומתקשרים בינינו בכל תקופה ותקופה. בטבלה הפשוטה שמצורפת כאן אני מבקש למנות את התנודות העיקריות בין הקטבים של התפיסה האנושית, ולהציע הסבר ראשוני ליחסים בין המדיום שבעזרתו שיקפנו את עצמנו, לבין תנועת מטוטלת התפיסה – לכיוון איחוד או הפרדה.

טבלה

הטבלה מתייחסת לארבעה מקרו־תהליכים החופפים להתפתחותו של מדיום אחר בכל פעם. שינויי הכיוון משולים לתנועת מטוטלת. ואלה הן ארבע התנועות שאליהן הטבלה מתייחסת:

מההיפרדות של האדם מעולם החי (עם התפתחות הדיבור) אל 2. היווצרותם של עמים וחברות, תוך ניסיונות לכונן אימפריה עולמית אחת (עם התפתחות הכתב והדפוס) אל 3. התפוררותן של החברות לאינדיבידואלים (עם המצאת הקולנוע והטלוויזיה) אל 4. לידתה מחדש של הקולקטיביות מהמדיום הווירטואלי (עם התפשטות האינטרנט)

<<



יונאס הנסן וקלאס יאן מולמה "מכונת תגובה", 2006
Jonas Hansen, Klaas Jan Mollema "Reaction Machine", 2006

כיוון התפתחות התפיסה	המדיום הנלווה להתפתחות	אופן חוויית המדיום – במאוחד או בנפרד	ההתרחשויות ההיסטוריות	התנודה
אל הפרדה	דיבור: מהתפתחות השפה עד המצאת הכתב	במאוחד: באופן פתוח במרחב חושי משותף	פרהיסטוריה: האדם נפרד מעולם החי – מתחילת היווצרותן של להקות מדברות ומדמיינות בעזרת שפה ועד לתחילת ההתאגדות לעמים בטריטוריות קבועות, פחות או יותר, ולשימוש בכתב	תנודה I: תנודת השפה
אל איחוד	כתב: מהמצאת הכתב, דרך הפצת הדפוס ועד להמצאת הקולנוע	בנפרד: כל כותב וקורא נמצא לבד מול הטקסט	מהעולם העתיק ועד מלה"ע השנייה: השבטים מתאגדים לעמים, ללאומים ולמדינות, אימפריות עולות, ולבסוף נעשים ניסיונות אלימים להשליט על העולם אידיאולוגיה אחת בידי תרבות אחת	
אל הפרדה	קולנוע: מהמצאת הקולנוע דרך התפתחותה של מדיה ממשיכה – טלוויזיה, וידיאו – ועד המצאת האינטרנט	במאוחד: כל הצופים ניצבים מול אותו דימוי בבית־הקולנוע, במרחב חושי משותף מדומה	ממלה"ע השנייה ועד שנת 2000: עידן השוק החופשי. התפיסות החברתיות השונות מתפוררות, רעיון שלטון השוק (שהומצא כדי לנצח את בריה"מ במלחמה הקרה) מופץ ומיושם ביותר ויותר מקומות, החברות והתרבויות מאבדות את השפעתן, עד יצירת חברות האדמסך	תנודה II: התנודה הווירטואלית
אל איחוד	אינטרנט: מהמצאת האינטרנט, התפשטות הרשתות החברתיות ועד...	בנפרד: כל משתמש ניצב בנפרד מול מסך של מציאות מדומה	2000	

הערות והסבר לטבלה:

על אופן חוויית המדיום – כשניגשתי לאפיין את האופן שבו נחווה כל מדיום ביחס לאותו ציר עיקרי שאנחנו בוחנים – הפרדה ואיחוד, התברר לי שיש היפוך באופן החוויה בכל פעם שמדיום חדש עולה. הדיבור, למשל, הוא פעולה שנעשית במרחב ה**משותף** של החושים, בעוד שכתיבה וקריאה מתקיימות תוך **הפרדה** של הקורא או הכותב. הצפייה בסרט היא חוויה **משותפת** לקבוצה של צופים, במציאות מדומה משותפת, והגלישה ברשת היא חוויה **נפרדת** של אינדיבידואל בתוך מציאות מדומה.

על המדיום – בחרתי בסוגי מדיה שהיו דומיננטיים; אלו שמקובל להניח שאיתם ובתוכם אנחנו מעצבים את תפיסתנו את עצמנו. למשל, במעבר בין המצב השני לשלישי החיים מפסיקים להיחוות בעיקר כסיפור, ומתחילים להיחוות יותר כסרט. נכון להגיד גם שאמצעי התקשורת השונים התפתחו זה לצד זה, ואף מדיום לא נעלם כליל: האפשרות לראות בדיוק את מה שאתה רוצה באינטרנט היא המשך ישיר של ריבוי הערוצים בטלוויזיה; הישיבה מול המסך לבד היא המשך של התנועה מהקולנוע אל הווידיאו בבית, וכו'. התהליך הוא של ריבוד. ועדיין – מדיום חדש שמאפשר שיקוף **נוסף** של המציאות, יאפשר אופני תקשורת חדשים בין בני אדם, תפיסת מציאות שונה ומבנים חברתיים־פוליטיים חדשים.

על המודל – בחרתי להיעזר במטפורה של תנועת מטוטלת כדי להסביר את התהליך, אף שתנועת האור מאפשרת הסבר מקיף יותר להתקדמות חלקיקים תוך כדי תנודה. הקסם של המשלת התפיסה האנושית לאור הוא עתיק כנראה כמו התפיסה עצמה, ורענן עדיין כמו האור העל־זמני עצמו. אולי במאמר אחר, ארוך מעט יותר, אוכל להפליג ולהציג את ההתאמה היפה שנוצרת, כשלוקחים בחשבון את ההשפעה של האור ככוח מפריד בטבע, וכנגדו את כוחות הכבידה המאחדים. אז יהיה אפשר להניח לרגלי כל סקרן או סקרנית את העולם האמפירי כהשתקפות, כמודל, ולנקוט בכך איזו פעולה משמעותית כנגד קידוש החומר, שמתממש בשלטון הטכנולוגיה על האדם בדמות השוק החופשי. אבל עד אז...

מסקנות ראשוניות מהמודל

1. קיים יחס הפוך בין אופי חוויית המדיום לבין התנועה אל איחוד או הפרדה. כלומר, מדיום שנחווה בשיתוף מלווה תנועה אל תפיסה מופרדת, ולהפך – מדיום שמתקיים ביחסים של הפרדה מלווה תנועה של שיתוף. הקריאה והדפוס, למשל, נוצרים ומתקבלים כשהקורא או הכותב מופרדים מהסביבה, ובמקביל לשימוש בהם התרחשה התנועה של איחוד שבטים לעמים ואיחודם של עמים תחת אידיאולוגיות. הקולנוע נחווה בשיתוף, ובתקופת השפעתו העיקרית התרחשה תנועה אל הפרדה. אותו יחס מנוגד מתקיים גם בין הדיבור לתנודה לכיוון הפרדה, ובין התפתחות האינטרנט לתנודה בכיוון ההפוך.

2. המדיום שנחווה בשיתוף מייצר ייצוג מקובל, וזה שבא אחריו, שנחווה בהפרדה, מאפשר עומק לאותו ייצוג. כלומר, הקולנוע והטלוויזיה ציפו את המציאות בייצוג מצולם, ואילו האינטרנט העניק לו עומק והפך אותו למרחב שיש בו בחירה ואפשרות ייצוג ויצירה לכל אחד. הדיבור ציפה את העולם במילים, ואז הגיעו



המיצב האינטרקטיבי "מכונת תגובה" של יונאס הנסן וקלאס יאן מולמה פועל על המרחב האינטימי של מתח בין אנשים. מאזן כוחות, קלט אישי ושילוב של טכנולוגיות ישנות וחדשות הם כולם חלק מהחוויה. "מכונת תגובה" היא מערכת פתוחה, שבה תגובת הצופה מכתיבה את יצירת האמנות.

הפרויקט מתבסס על חיבור אינטראקטיבי ואינטימי של הצופה עם קודמיו לחוויה ניסויית. האמנים מתמקדים בהיבטים מגוונים של מפגשים, תקשורת ושפה, אינטראקציה בין זרים, חלוקת רעיונות ותנועה, מגע ישיר ושימוש בחפצים פיסיים. מתוך היבטים אלה פותח קונספט המבוסס על פעולה מכנית פשוטה של סיבוב ידית היוצרת סיפור רב־שכבתי מוקלט (בדומה לכתיבת משפט וקיפול נייר כך שרק המשפט האחרון גלוי והנייר מועבר לאדם הבא בתור להמשיך לכתוב) בסופה של התכתובת מובא לצופה הבא סיפור בהמשכים בלתי צפוי.

הכתיבה והקריאה ואפשרו עומק נוסף לשפה, לאותה מערכת ייצוג.

3. המטוטלת מאיצה. המעבר מהתפתחות הדיבור ועד המצאת הכתב לקח הרבה יותר זמן מאשר זה שנדרש לכתב להשלים את המהלך אל תפוצת הדפוס, ועוד הרבה פחות זמן לקח לקולנוע להתמסמס אל הטלוויזיה ולהפסיד לאינטרנט. מדובר בהאצה אקספוננציאלית, וייתכן שאנחנו דור מעבר אל דור של מעברים. אנחנו נוהגים לומר, שאנחנו הדור היחיד עד היום שחווה שני מעברים, ומכיר את ההוויה כספר, כסרט וכממשק לממשק וירטואלי, אבל סביר להניח שהדור שמתבגר עכשיו, יהיה הראשון שיחווה חילוף מדיום כל כמה שנים.

4. המדיום שמבשר את היפוך הכיוון צריך להיות כזה שמתאים לכיוון הישן, ובו־בזמן מאפשר את הכיוון החדש. למשל, האינטרנט מתאים לאדם שהופרד לחלוטין בתקופת הטלוויזיה, אבל מאפשר את הגילוי מחדש של השיתוף. הטענה הזאת היא אולי המסקנה המעניינת ביותר. אפשר לומר שהמדיום כאילו תופס אותנו בשיא התנועה אל הלבד או אל היחד – הוא מאפשר לנו לחוות את המצבים האלה טוב יותר מהמדיום שממנו נמסרנו "לידיו", אבל מתוכו אנחנו כבר בעצם משקיפים אל הכיוון השני.

5. כל תנודה של המטוטלת מביאה למצב קיצוני יותר. בנפרד מהתנועה של המטוטלת יש התקדמות במרחבים אחרים. הסדרים הופכים מורכבים יותר, הטכנולוגיה מתקדמת, יש יותר ידע, התהליכים משפיעים על יותר ויותר אחוזים מהאנושות, ולכן כל תנועה תשיג אפקט גדול יותר כשהיא תתממש. מדובר כאן בהנחה בלבד, כי אפשר להשוות רק מקרה וחצי, אבל הגיוני לחשוב שאם העידן ההיפר־קפיטליסטי הביא לשיא את הפרדת הפרט, בעוד שההפרדה שהדיבור יצר הביאה רק להתבדלות של שבטים מתורבתים מהטבע, הרי שבהמשך ההתפתחות, תנועת האיחוד שהתחילה עכשיו תביא להאחדה קיצונית יותר מזאת של המודרניזם לקראת שיאו.

אז מה?

אז מה אפשר לעשות עם כל זה? אני מקווה שהמודל המוצע שימושי, במובן זה שהוא מספק הבנה טובה יותר של ההוויה הסוערת שצפויה לנו בשנים הקרובות, ויותר מזה, בכך שהוא מאפשר לדייק בפעולות ובבחירות שנעשות בזמן הקריטי הזה של שינוי כיוון. במידה שהמודל הזה אכן מייצג – הרגע שבו המטוטלת משנה כיוון, הוא הרגע שבו אפשר להשפיע עליה בקלות. למעשה, כל כוח משפיע עליה ברגעים האלה וקובע את הסטיות שלה מהתנועה הישירה אל הקוטב השני. חוץ מזה, בעוד איזה עשור־שניים, כשיתחיל לתפוס תאוצה איזה מדיום מאחד טוטלי, שכל העולם הולך להשתתף בו בבת־אחת, באביונה מתמדת, תוך כדי כך שהמחשבים עושים את כל היתר, אתם תדעו כבר מה השלב הבא...

אב שביט הוא אמן עצמאי, אוהד של גלריה אלפרד ויצרן מנורות
http://www.facebook.com/YoavShavitStudio



עמרי בן־יהודה

הרכבת של הנאורות

אל אחת הערים העניות, הדתיות והרב־תרבותיות ביותר בישראל הוכנסה, כמעט בכוח, הרכבת העירונית הקלה. בתום שנת פעילות מתאר עמרי בן־יהודה איך מקבלת ירושלים את אחד מסמלי התרבות האירופית, ולמה לא מדובר כאן בסיפור של אהבה ממבט ראשון

סתיו 2012. בסופו של דבר, חובה להודות שמרגש כל פעם מחדש לראות את הרכבת חולפת על פנינו. מרגש, ולא רק במובן סכריני נטול קונפליקטים, אלא דווקא מכיוון שזהו סיומו של מסע קשה מנשוא, ארוך כל־כך, כמעט בלתי אפשרי. עכשיו, במין תנודה חרישית וסטואית הגיע המסע לסיומו: הרכבת הקלה בירושלים נוסעת כמעשה שגרה. אתמול עליתי עליה ביחד עם נחיל אנשים. הרכבת עדיין חדשה ומרשימה, על אף שקרונותיה כבר בני שש ושבע שנים, גדולה בהרבה מחשמליות סטנדרטיות בעולם, נושאת המון בני אדם המתגוררים באחת הערים העניות בישראל; המון של ילדים בעיקר, ערבים ודתיים, נרגשים ומבולבלים כמו המבוגרים, מחכים להנחיות מבני הנוער הרבים המוצבים על תוואי הרכבת ומנסים לעשות קצת סדר.

נכון שהסיבות לכך שהקמתה ארכה למעלה מעשר שנים הן בעיקרן טכניות, ואולם חוסר היכולת להפעיל אותה לא מצליח להתיישב רק עם נתונים כאלה. ברור שירושלים לא יכלה לסבול את כינון התוואי הזה בתוכה מכל מיני סיבות, ובעיקר תרבותיות. הרכבת הקלה (כמה קלה ככה קשה) היא עבור ירושלים הרכבת של הנאורות.

בתקופת הייסורים של לידתה משפחות שלמות נוצרו; אלפי ילדים, היום כבר נערים, נולדו. לחשוב על עשרה אחים במשפחה חרדית, עולם שלם שנברא בצילה. אני, באופן אישי, העברתי את השליש הבוגר של חיי, את כל תקופת הלימודים האקדמיים שלי, כמעט שלושה תארים באוניברסיטה ועוד תעודת בוגר בית־הספר לקולנוע, בזמן הזה. קשה למנות את מספר האהבות והפרידות, הייסורים וההתרגשויות, שליוו את תושבי ירושלים כל־כך הרבה שנים; קשה לספור את אלה שעזבו אותה, ואת אלה שעברו אליה. והנה, לפתע זה קורה, היא נוסעת, גם אם ממש בעצלתיים, שהרי הרכבת עומדת ברמזורים, וכל עצירה שלה אורכת הרבה מעבר למקובל, משום שהיא חשמלית ענקית, המובילה 500 איש לדרכם. ועכשיו כל הילדים הנרגשים, המתים השותקים והמבוגרים הסובלים כאילו נשכחו, עוד פרק בהיסטוריה בת 3,000 שנה.

הרבה מהנוסעים לא מכירים חשמליות, הם כנראה עניים מדי בשביל לנסוע לבקר באירופה העשירה, מחכים שהדלת תיפתח מאליה; צריך להראות להם שיש ללחוץ על הכפתור. אחרים, ילדים שכבר למדו את הטריק, רצים לאורכה מבחוץ וסתם לוחצים כדי לעכב את סגירת הדלתות. בתחנות המרכזיות עומדים הסדרנים וצועקים: "קודם לתת למי שבפנים לצאת, לחכות בסבלנות, סבלנות... עכשיו אפשר להיכנס". תהליך ההסתגלות החל. ואז מגיע גשר המיתרים, וכולם משתאים עוד יותר לנוכח הלונה־פארק בחסות העירייה, כשמתגלה הנוף המאכזב מלמעלה.

תהליך ההסתגלות לא פשוט. תהליך ארוך ההופך סובייקטים נזילים, סוררים, חצופים, לסובייקטים נאורים, מנומסים, אדיבים, צייתניים, שמזדהים בקלות עם ערכי הטכנולוגיה והקִדמה של מסילת החשמל החסכונית, הנוסעת בבטחה, בלי קפיצות כמו האוטובוסים, בעלת הכרוז המכריז את שמות התחנות בעברית, אנגלית וערבית. כבר בנסיעה היחידה הראשונה הייתי עד לכמה ריבים קשים בין אנשים שניסו לצאת, לבין כאלה שניסו להיכנס. גם הרכבת הזאת, כמו כל סמל אצלנו, תהפוך בטח לטראומה.

אני חשבתי על עגנון, שכתב הרבה על ירושלים, ותמיד תיאר את הציפייה ל"אבטובוס" שאין לדעת מתי יגיע, ואם יגיע בכלל. וגם אם הוא ישנו, בצידו תמיד התלבטויות, האם לעלות עליו או ללכת ברגל. בסוף, אם אין פחד מערבים, הולכים ברגל (בדרך־כלל ממרכז העיר לבקעה־תלפיות). זה עשוי להיות יותר קצר, וגם חינם. כך הוא מנפרד הרבסט, גיבור "שירה" המפורסם, וכך המספר, הוא המחבר המשתמע, ב"ספר המעשים" ובמקומות נוספים. האבטובוס יוצא "**פעמַים בכל שעה ופעמַים בכל חצי שעה, הכול לפי זריזות הנהג ולפי רוב הנוסעים**" ("האבטובוס האחרון", "ספר המעשים").

כל התוואים שירושלים אפשרה כל הימים לתושביה, הם כאלה של חוסר סדר ושל תלות ברצונו הטוב של הנהג, במחויבות ובקשר שבינו לבין נוסעיו. ואילו המסילה היא תוואי אחר, חד־כיווני, מלא תנופה וכוח, של העירוניות המערבית בשיאה, של הנאורות האירופית המוקפדת, השקולה, האוניברסלית כביכול; התוואי הוא תוואי העם, הוא גאוות האנשים, גאוות הציוויליזציה. לא במקרה מי שעמלו כל השנים על הפרויקט הירושלמי הן שתי חברות, גרמנית וצרפתית. שתי האומות האלה מייחסות לעצמן (במיוחד בעידן האיחוד, ובמיוחד עכשיו לקראת העידן שאחריו) את האירופיות המערבית, בתוכן נולד גם המושג של האוניברסלי והנאור. אני מרשה לעצמי לנחש שהן גם מן המדינות בעלות התחבורה הציבורית המתקדמת בעולם.

ובאמת, אותה נסיעה סטואית חרישית של הגוף הטכנולוגי הגדול היא נסיעה מנוכרת. שהרי מה ששולט באוטובוסים ובמוניות הישראליים הוא היחס הבלתי אמצעי, החם, העצבני והתלותי שבין הנוסעים לנהג. ברכבת אין למעשה נהג. אין איתו אינטרקציה, משום שמלאכת הכרטוס עברה למכונות החכמות, אך אולי יותר מכול, משום שאין מוזיקה ורדיו, והנהג איננו יותר האיש האחראי עליהם ועל הווליום.

אין ספק שהיתרון הגדול הוא בכך שיש שקט סוף סוף, ואפשר אפילו (אולי רק לחלום על) לקרוא ספר בזמן הנסיעה, או לנהל שיחה נינוחה. זה, כמובן, רק במקרה שאין סביב בני נוער עם טלפונים ניידים עצבניים, שמוסיפים בדיוק את מידת האדרנלין הלא־רצויה לשמש הישראלית האיומה. אבל ההפסד, ההפסד הוא המרכיב האישי. כשאדם יחיד, אינדיבידואל בודד, שחוק ופגוע משגרתו הקשה, עולה לבסוף על האוטובוס אחרי ציפייה ארוכה

>>

>> ומקבל אותו נהג חייכן (או עצבני), כשברקע צליליה הקצביים והחייכניים של שרית חדד, הוא יודע שעלה למקום שבו יש לו זכות להתקיים גם בין אנשים, בין הזקנה שבדיוק נרגעת גם היא ממאבקיה עם שקיות הקניות, לבין חבורה אחרת של נערים המנהלת שיחה ערנית.

במאמרו הקלסי "DissemiNation" יצר הסוציולוג **הומי בבה** הבחנה מרתקת במרחב התרבותי של האומה (nation space) בין הציוויים הפדגוגיים, המהווים את נתינותו של הסובייקט למערך היומיומי כאזרח (ציוויים ברוח הנאורות והקדמה במקרה של מדינות המערב), לבין ההתרחשות הביצועית בפועל של הפרטים בתוך האומה. לדעתו, מרחב האומה נמצא ונוצר ומאושרר בעצם על־ידי המאבק היומיומי הזה שבין הפרפורמטיבי לפדגוגי. מדובר ברגע שבו, לדוגמה, המהגר הטוניסאי משכבר מוצא את עצמו עומד בתור בבנק דיסקונט, ולרגע חש זרות לסמלים הפדגוגיים; לרגע הוא ודיוקנו של משה שרת שעל שטר הכסף אינם חשים בנוח אחד עם השני. האני האישי והאומה, שניהם עוברים כינון תמידי בין זהות לבין חוסר זהות, קרבה וריחוק. המאבק הזה בין הפדגוגי לפרפורמטיבי הוא חיוני, משום שהוא אינו מאפשר לכל אידיאולוגיה להיות שקופה, טבעית, מובנת מאליה. אפילו לא לאידיאולוגיה של המדינה.

במקום כמו ירושלים, שבה נחיל האדם הממלא את הרחובות נראה יותר כמו נהר גנגס אנושי, שחילון וקדושה משמשים בה בערבוביה (כמו גם קדמה ונחשלות), ישנו פער גדול בין הציווי הפדגוגי של המדינה, החושקת במערב החילוני־ליברלי, לבין הקיום הדתי שלה. בימים אלה אנו רואים, שהמאבק הסכיזופרני בין דמוקרטיה ליהדות מגיע לכנסת ולפני שנה הוא שרה גם בכל מחנות האוהלים. בירושלים המאבק הזה הוא כמעט מובן מאליו.

בשנים האחרונות הגותו של **מיכאיל בכטין** העסיקה אותי מאוד. גדול התיאורטיקנים של הספרות התעסק כמעט בכל כתביו ביחס הבלתי נתפס שיש בספרות בין הזמן למרחב; יחס שהוא בעצם לא מופרד, אלא מתקיים בטקסט תמיד יחד, זמן־מרחב – "כרונוטופ", כפי שהוא קורא לו (מושג שהוא פיזיקלי במקורו). לפני שנתיים, כשמסילות הרכבת היו עדיין עיי חורבות מפליאים ביופיים, בייחוד ברחוב יפו בימים החורפיים ביותר של מתחת לחמש מעלות, לא יכולתי שלא לראות בתוואים האלה של המסילה המחשות של כרונוטופים ספרותיים וגם תרבותיים.

זמן־מרחב צירי: מאפיין את רכבת מסילת הברזל הרגילה, הבין־עירונית. מאופיין בהתקדמות חד־משמעית למטרה, ליעד; הרכבת נוסעת תמיד קדימה, ובכך ממחישה את הזמן בצורה מוחלטת וליניארית. כל עצירה בתחנה אורכת מספר מסוים של דקות, וכל קישור בין תחנה לתחנה אורך מידה ידועה מראש של זמן, על־פי הקילומטרז'. קולקטיב הנוסעים ערוך ומציית למערך הזה, המפותח מאוד באירופה (חִשבו על רכבות האקספרס המהירות, ה־ICE הגרמנית וה־TGV הצרפתית). יוקר הנסיעה מחזק עוד יותר את תביעתו של הזמן־מרחב הזה על המציאות ועלינו (מרגע שעלית אתה שבוי בתהליך, ואולי מהרגע שבו קנית את הכרטיס). ואם לרגע ננסה להפריד בין הזמן למרחב, נראה שבכרונוטופ הזה אין מקום להתבוננות בסביבה הסטטית: הנופים מתחלפים בדהירה, וכולם מרוכזים בזמן, בפעולת ההתקדמות. בספרות נראה שאין דבר יותר מתאים להמחשתו מאשר הדרמה, ובעיקר הזיכוך שלה, היא הטרגדיה. הטרגדיה תובענית ומבוססת בעיקר על פעולות, על מפנים בעלילה, היפוכים והכרות – כל זאת על מנת להגיע בסוף למטרה, לקתרזיס.

אנאגנוריסיס, ביוונית. אחד ממאפייני הטרגדיה, לפי אריסטו. שינוי במצב התודעה לקראת היפוכה – הן בידיעה והן ברגש, עקב ידיעה וגילוי. לדוגמה, כשאדיפוס מגלה ומכיר בכך שהוא רצח את אביו.

זמן־מרחב רב־צירי: כאשר הצירים הופכים לרשת של צירים, מועלות בפני הסובייקט יותר אפשרויות. כאן עדיף לדמיין את רכבות התחתית העירוניות באירופה. הנסיעה זולה יותר, מדובר בדרך קצרה יותר, ולכן הקולקטיב פחות משועבד לנרטיב, למסע שאליו נכנס, שהרי אפשר להחליף רכבת בכל עת ולשנות יעד. מדובר בציר הבא במגע עם צירים אחרים וגם מעלה את אפשרות החזרה; בכל קו נוכחות על המפה שתי מטרות שמחליפות אחת את השנייה בתור תחנת המוצא והיעד (לחלופין). הפריסה של הקווים, של המסילות, היא פריסה רשתית יותר, מבוזרת, מתפזרת, מתעקלת, והתחושה שמתקבלת היא שלמרחב עצמו (ובמקרה הזה, למרחב העירוני) יכולה להיות משמעות בתוך הרשת הזאת, ובמיוחד **לדרך** עצמה כמושג כרונוטופי, שהרי בסופו של דבר, יעדים מסוימים מחייבים החלפה של כמה קווים. כך הציריות הנוקשה מאבדת את ערכה לטובת הכיוון הפתוח, הדרך.

מדובר כאן בתנועת תחבורה שמנכיחה את המרחב, משום שאותם קרונות שעושים את המסלול עכשיו, יעשו את המסלול ההופכי אחר־כך, וחוזר חלילה, ובכך הם מעמידים את שלל הצירים בתודעה החיה של העיר. כך גם בתודעה המיתית/תרבותית שלה: אני יודע שקו 6 בברלין יעבור גם בעוד עשרות שנים בתחנה המפורסמת Friedrichstrasse. יש כאן זיקה מהותית, כמו בסמל, בין המציאות לבין השרטוט שלה.

ואכן, מפות רכבות התחתית, על תוואיהן הצבעוניים, הפכו בעולם המערבי כבר מזמן לסמל של ממש של העירוניות הטכנולוגית המתקדמת, סמל שהוא גם אופנתי. אפשר לראותו על בגדים, יומנים, תיקים, וכן בשלל פרסומות העושות שימוש בקונספט העיצוב הזה. ככל שלעיר יש מעמד מיתי יותר בתרבות, כך גם המפה שלה מסועפת יותר בקווים ובצבעים (כאלה הן המפות של

לונדון ופריז, למשל). מידת התפוצה של מפה כזו בין התושבים של ירושלים. מעניין מה תהיה מידת התפוצה שלה בין התושבים.
גם בתרבות ובאמנות יש לרכבות התחתית חשיבות עצומה. דוד פרלוב, בסרטו "יומן", כינה את הרכבת התחתית של סאו־פאולו (אז היא הייתה בתהליכי בנייה) "הרכבת של העמלים". יש לזכור שזו גאוות אומות המערב, אך יש גם להניח שעל בניית התשתית הזאת עמלו אנשים שונים, שזיקתם ללאום חושפת את הניכור שבין הלאום הנישא לפרטים המשועבדים אליו. זהו פרויקט סוחף ומפליא ומרשים כל־כך, והוא מכיל בקרבו מרקם מרחבי של שפע תצורות, אך גם יכול לבטל את הפרטיקולרי שבתוכו. מערכת הערכים שלו היא של אותו אוניברסלי אמורפי, שגם מדיר את מי שאינו שותף טבעי לתחושת הקדמה. אירופה מחוברת לרכבות שלה באמת בדמה, הן מהות הקדמה ומהות המודרניזם, ויוצרים רבים נמשכים אל דימוייהן.

זמן־מרחב לא־צירי: מאפיין את התנועה התחבורתית של המכונית ושאר כלי הרכב הנוסעים על דלק ולא על חשמל: אוטובוסים, מיניבוסים, משאיות וכד'. במקרה הזה הנהג נוכח, ולקולקטיב יש אפשרות להימצא איתו תמיד במגע; אפשר לקחת רוורס בכל רגע ולהסתובב, כך גם לעצור ולהחליט על שינוי היעד. אין כאן צירים, ולכן גם אין כאן שרטוטים ומפות; זהו מרחב שמרכיב הפנאופטיקון והשליטה שבו חלש ביותר. הזמן־מרחב הזה נמצא בדרך־כלל במדינות ובערים שלא יכולות להרשות לעצמן מסילות מבחינה כלכלית, וכנראה גם המרקם הקולקטיבי האנושי שבהן אינו מאפשר זאת (אני מרשה לעצמי להניח שלו רומא הייתה באמת מתעקשת לפתור את בעיית התחבורה שלה, היא הייתה בכל זאת מוצאת את הדרך). אך זהו גם הכרונוטופ של אמריקה, ממלכת המרחבים והחופש, הנחווים מתוך המכונית הגדולה, הסמל של החופש המוחלט, כב"תלמה ולואיז", או של הלא־נודע המאיים, כבתעיות המכונית בסרטיו של דייוויד לינץ'. חשוב להזכיר גם שהספרות והקולנוע של המערבון הלכו ונעלמו ברגע שב"מערב הפרוע" התחילו בבניית מסילת הברזל. המסילה היא המסמן של הסדר.

מתקן אדריכלי שהגה הפילוסוף המדיני ג'רמי בנתם, שנועד לארגן ולמשטר את החברה – בתי־סוהר, בתי־ספר, מפעלים וכו'. עקרון הפעולה של הפנאופטיקון הוא בידוד ומעקב מתמיד (פנ – הכול, אופטיקון – לצפות, להתבונן). מישל פוקו ראה בפנאופטיקון מטפורה מרכזית לכוח הממשמע המודרני, המבוסס על בידוד, אינדיבידואליזציה ופיקוח.

בתוך העיר, אני לא חושב שיש זמן־מרחב שיכול להמחיש את זה יותר טוב מאשר מערכת התחבורה הירושלמית. אחד הדברים החשובים שגורמים לחברי מגרמניה להשתומם כשהם מבקרים כאן הוא הקריאה הידועה, שיכולה להישמע בכל שלב בזמן הנסיעה, ללא קשר לתחנות העצירה – "נהג! נהג!" במקרה שהנהג שכח לפתוח או שהנוסעים שכחו לצלצל, או שכמה מטרים אחרי התחנה עולה אישה עם עגלת תינוק (ובדרך־כלל במגזר החרדי מקיפים אותה עוד כמה זאטוטים), או שמישהו מתקשה לעלות בגלל עשרות הסלים (או יותר נכון, וגם זה שינוי מרחבי מהותי מאירופה: שקיות על גבי שקיות), או שמישהו מתקשה לרדת. כל הסיפורים האלה עבור ירושלמים הם כמעט בגדר קלישאה, אך כשבאים לתוך העיר מבחוץ, אי־אפשר שלא להשתאות על המרקם האנושי שבה, שאין לו אולי אח ורע בעולם כולו.
זהו תוואי ללא תוואי, ולכן גם לפרט יש זיקה מחייבת אל הכלל, משום שכל אחד עלול להזדקק לעזרה, כל אחד עלול ליפול, ובכלל, בכל רגע עלול לקרות משהו (שלא לדבר על המרקם האנושי המתוח בתקופות טרור). אין לי ספק שבכטין המרקסיסט היה גומר את ההלל על כרונוטופ מן הסוג הזה ומעדיף אותו בהרבה על פני הכרונוטופים שמציעות הערים הגדולות של צרפת וגרמניה, בהם הדריכות היחידה היא בין הפרט לעצמו תוך נסיעה שלווה, המלווה בדרך־כלל בקריאת ספר או שמיעת מוזיקה באייפוד.
הגיוון האתני של פריז, על קהילת המוסלמים הגדולה שלה, או של ברלין, על המיעוט הטורקי המפורסם, נמצא הרחק מאחור בהשוואה לעירנו האפרורית. חברה **שכולה** חברת מהגרים, חברה שכולה עשויה ממיעוטים, ובעיקר חברה שבה המרכיב החילוני המערבי השולט הוא לא אחר מאשר עוד מיעוט קטן ומוקע. זהו כרונוטופ הפוך כמעט לכרונוטופ של הרומן האירופי, גוף שהסמיוטיקה שלו לא יכולה לאפשר סמל מכל סוג שהוא, לא יכולה לאפשר תנועה עלילתית אחת, ובוודאי שלא מרחב או זמן מאורגנים.
לזמן־מרחב הזה אין מקבילה ממש בספרות (אולי רק התלמוד, התושב"ע, יכול להוות משהו מן הסוג הזה), כי זהו הזמן־מרחב של התנועה וההתפשטות של החיים. החיים עצמם בירושלים. עכשיו נותר לראות אם יצליחו לחנך את התושבים, ולמצוא לכך ציוויים כגון Einsteigen bitte, zurück bleiben bitte (לעלות בבקשה, להישאר פנימה בבקשה) הברלינאי, או Mind the gap (שימו לב לפער, או המרחק, שבין הרכבת לרציף) הלונדוני.
והנה, כשהגיעה המסילה ממש בהתחלה, בשנות התשעים של המאה התשע־עשרה, וחיברה את ירושלים ליפו, אותה התנגשות תרבותית שאני משרטט כאן בניסיון לקרוא מבני עומק של התרבות, התפרצה לקדמתו של שיח בוטה בין הרבנים־השמרנים לאנשי הקדמה. כך כתב אליעזר בן יהודה בעיתונו "האור" בשנת 1892:
"שמעו המונים: נהמת הקיטור היא נהמת ניצחון ההשכלה על הבערות, העבודה על העצלות, החוכמה על ההבל, הקדמה על האחור, השכל על הסכלות, ניצחון הרוח הצח והמבריא על רוח הקטב והמרירי, ניצחון המשכילים על המהבילים.

>>

>> **"שמחו מאורי האור, משכילי ירושלם!"**

נובמבר 2011. עברו כבר יותר משלושה חודשים מאז יציאתה לדרך. עכשיו היא עתידה לתת שירות בתשלום. אפשר לומר כמה חידודים על החוויה החדשה הזו בנוף הירושלמי. עד היום לא הפנימו האנשים את זכות הקדימה שיש לתת למי שיוצאים מהקרונות, על אף שהמסר הזה הוחדר אינספור פעמים על־ידי הסדרנים, הנהגים ועל־ידי הצגים המראים את זמן ההגעה. כושר העמידה האיתן של הירושלמים הוכח.

הצגים מראים, כאמור, הכול בשלוש השפות הרשמיות, לא בלי כמה טעויות חינניות כמו "עקב תקלה תכנית" (יש להודות שזה נשמע פילוסופי בהרבה), וכך גם בכריזה המוזרה, שבה קריין ישראלי אחד מכריז בעברית ובאנגלית (כשהוא מחקה מבטא אמריקאי), וקריין אחר, בהקלטה עמומה בהרבה, מכריז בערבית. כמובן שהישראלים יודעים אנגלית ברמת שפת אם, ולא ערבית. לפעמים הסיטואציה היא פוליטית ממש, כשהתחנה נקראת בעברית "גבעת התחמושת", בערבית "א שייח' ג'ראח" ובאנגלית "Ammunition Hill".

מעולם מזרח העיר הערבי לא חובר בצורה כל־כך בולטת לשאר חלקי העיר. מעולם לא היו הערבים כל־כך נוכחים – בתוך הרכבות; בחוץ, בתחנות, על החנויות שלהם והשילוט הערבי, בלשון שלהם, הבאה לביטוי גרפי ושמיעתי גם יחד. ייתכן שהרכבת הזו היא סָמן מאוד רציני של התרחשות דו־לאומית עתידית, אך גם סיפורי קרבות רבים עלו לכותרות המקומונים.

יש כמובן להתייחס למקומן של הרכבות והמסילות בתודעה היהודית במאה העשרים. אלה מזוהות עם אירופה, ועם גרמניה התעשייתית בפרט, כאחד האייקונים המרכזיים בשואה. במידה מסוימת, כמו שהשואה היא מימוש קיצוני במיוחד של נטיות אנושיות בסיסיות, כך היא גם מימוש קיצוני במיוחד של פרויקט הנאורות והרציונליזם. התורה הנאצית הייתה המשך ישיר של הפוזיטיביזם המדעי, המזוהה עם הקדמה של המאה התשע עשרה. כמו תנועות אקולוגיות נאורות בימינו, גם הגרמנים דאז חשבו שהם נותנים שירות אמיתי לאנושות בכך שהם מפרידים בין בני האדם, מסווגים אותם ומשתדלים למחוק (גם כן בצורה יעילה וממחזרת) את הזבל האנושי שבקרבם. כך גם הרכבות הנאציות הן התממשות קיצונית במיוחד של מהות הקיימת בלאו הכי במושג "תחבורה־ציבורית" – דהיינו הובלת המונים. למעשה, מתוך נקודת מבט ביו־פוליטית, נראה שהניתוק הראשוני של האדם מקיומו הביתי, המשפחתי־קהילתי, הוא הטרנספורטציה הנכפית עליו מכוחות עליונים לעבור ולהתרחק ולהתנייד.

לבקש או לדרוש מירושלים שתהיה נאורה, יפה, מטופחת, עשויה בממדים הומניים לבני האדם, לאזרח החי בתוכה, הוא לא רק מעשה חסר תכלית, אלא ממש פשיעה, מעשה אלימות. כי מה שיש בירושלים הוא בשום אופן לא האדם, ובוודאי לא זה האינדיבידואל, הפרט הביוגרפי־פסיכולוגי, שחייו הם התגשמות רגעית של עולם כלשהו, על מאווייו הפנימיים. ירושלים, במקום זה, היא העיר של המקום, ואין זה מקרה שבעברית המקום הוא גם האל.

חוסר האפשרות של ירושלים להיות עיר מתוקנת הוא צביונה החריף והאמיתי ביותר. היא כאילו מחויבת להיות כעורה, מחויבת להיות מרופשת, כי כאן האדם כפרט נגמר, והחיים, כהיסטוריה אלוהית של מקום, מתחילים. אי אפשר לבקש מאנשיה שיהיו אנשים יותר טובים, פחות נוקשים, פחות דתיים, פחות עוינים, משום שאז ההומניזם מתגלה ככסות אלימה של ערכים, שהקשר האמיתי בינם לבין החיים הוא בלאו הכי קשר מומצא ומנותק, שהרי הצדק והיופי, כמו הרוע והלכלוך, קיימים בכל המקומות כולם, ואולי יותר מכול בעירו של המקום עצמו, שאינה עירו של האדם.

כמה מהטורים החריפים ביותר שעמדו על חוסר ההומניות של העיר, הם אלה של לאה גולדברג מתוך "בהרי ירושלים" שלה:

כל הדברים אשר הם
מחוץ לאהבה
באים אלי עכשיו –
הנוף הזה ותבונת הזְקנה
אשר לו, המבקשת לחיות
עוד שנה, עוד שנה
עוד דור דורותיים, שלושה.
עוד נצח אחד.

קשה ממש לתאר זוג ההולך ברחובותיה של ירושלים יד ביד. הם צפופים מדי, מתישים בירידות והעליות העצומות שלהם, קשים בירידה התלולה של הטמפרטורות בין היום לבין הלילה, קשים מבחינת האידיאולוגיה שלהם, בין גבר לאישה, ובוודאי שבין גבר לגבר ובין אישה לאישה. מערכת התוואי והתחבורה היא רק עוד נדבך של קושי לאדם החי בתוכה.

מה מופלא ומחריד בכל הדברים אשר מחוץ לאהבה? אני חושב שיותר מכול, היותה של האהבה מוגבלת בעצמה. ככל מאווייו של האדם אולי, גם היא פחותה אל מול ההתרחשות, החיים, ובעיקר אל מול מה שעומד בחוסר תנועה – הנוף, האבן, המקום. פילוסופיית הרצון של שופנהאואר, ואחר־כך התיאוריה שהעמיד פרויד ב"מעבר לעקרון העונג", עמדו על היחס הזה בין רצון האדם, תשוקתו, אהבתו, ניידותו ותנועתו לבין הסטטיות של המוות העומדת לבסוף בכול.

אבל כאן, בבית הזה של גולדברג, עולה גם משהו אחר, אותה תבונה של זיקנה. מתחולל כאן משהו מרתק מבחינת הלשון השירית: הנוף מבקש לחיות, אך מיד מתברר לנו שהבקשה היא גם המימוש; בעוד התבונה מבקשת, היא גם חיה "דור דורותיים, שלושה", ולבסוף מסכמת הכול באוקסימורון החריף של השאיפה ומימושה, שכן איך אפשר לבקש "עוד נצח אחד"? הנוף הולך והופך כאן למהות נשית, שהיא התבונה המבקשת בשם המקום לחיות. התבונה מבקשת לחיות, אך בכך רק חושפת את עמידתו הסטטית והדוממת, הזרה לאהבה, של המקום.

עגנון הביא בסיפוריו הרבים על העיר הזאת את כל המתחים האלה, ובייחוד אולי ברומן הגדול שלו, "תמול שלשום", המתאר את יצחק קומר, גיבור הרומן, בדרכו מאירופה ליפו, ומיפו לירושלים (שהיא נוכחות פראית של חוסר רציונליזם דמוני), ומירושלים, איך לא, למותו. אותו יצחק קומר עובר בתחילת הרומן מסע ארוך ברכבת תוך שהוא חולף על נופיה השונים של אירופה, כחלק ממהלך של פתיחה פנורמית, מהרהרת, דוהרת אך איכשהו גם שוהה, שקשוק איטי אך בוטח. ביפו נפגש יצחק עם סוגים שונים של אנשים אירוטיים צעירים, הורמונליים וחופשיים, כשהוא נקלע למשולשי אהבה שבהם הוא בודק את זהותו בין אהבת נשים לאהבת גברים.

בסוף, בהגיעו לירושלים הוא מגיע לחיבור אירוטי מזהם ומאיין עם כלב שהוא כולו תשוקה לא מווסתת, ואז הוא מת. כך נראית אצל עגנון הציונות בתנועתה לירושלים. המודרנה מתחילה בשקשוק הרכבת ומַבנה את תקוותיו של הסובייקט הצעיר, וירושלים מאיינת אותו בתוכה.

מבין עשרות סיפורי הצדיקים המופלאים שלו, המתרחשים בדרך־כלל בגלות, בחר עגנון להביא את המימוש הדרמטי ביותר של דמות הצדיק בארץ ישראל בדמותה של אישה ירושלמית, היא תהִלה. מוטיב חזק מאוד בסיפור הוא זה של היופי: יופייה של הזקנה הצדקת, כמו יופייה של העיר, כנוכחות אחרת של התגלות בתוך המקום הסטטי. במקום אחד בסיפור הוא ממש עומד על כך, שמהותה של ירושלים היא בחוסר יכולתו של האדם לבנות ולטפח אותה:

"המחדש בטובו כל יום מעשי בראשית מחדש בכל שעה את עירו. בתים חדשים אינם נבנים, נטיעות חדשות אינן ניטעות, אבל ירושלים עצמה מתחדשת והולכת. כל אימת שאני נכנס לעיר דומה עלי כחדשה. איני יודע מה חידושיה".

עגנון לא ידע שברבות הימים יתחילו לבנות אותה בצורה כל־כך מסיבית, ובכל זאת תוך הקפדה כמעט אלוהית לשמור על כיעורה המוחלט של כל בנייה ובנייה. הדוגמה של בנייני הולילנד היא >>



"יצא לי להגיע לרכבת באמצע היום ולראות שכתוב על הצג 'אין שירות'. ומה עשו אזרחינו אנשי שלומנו? המתינו. ובהמוניהם. בהתחלה התקצפתי ולחצתי על כפתור החירום. כמובן שאף אחד לא ענה לי. אבל אז, כשפניתי למבוגר אחד ואמרתי לו, 'למה בדיוק אתם מחכים?' והוא ענה, 'מי יודע, אולי היא תבוא...', הבנתי שעוד לא השלמתי מספיק עם גדולתה של הציפייה הדוממת של עירי. כמו הגשם שלא בא, ולא בא עוד מימי התנ"ך, ירושלים מצפה"

<< המפורסמת ביותר.

הרבה משנותי הבוגרות הקדשתי לתיאוריה של הטראומה, ולנרטיב הטראומטי המפעיל אותה. זהו נרטיב דרמטי ביותר, תמיד משתיק יותר משהוא אומר. רק אחרי ארבעה חודשים מיום כתיבתו של הטקסט הזה התחוור לי מהי השתיקה שלו. הרכבת הקלה החלה להיבנות בדיוק בשיאה של אינתיפאדת אל־אקצה, שאותה חוויתי, כמו את כל שאר פיגועי הטרור של שנות התשעים, כנער ירושלמי מתבגר. במובנים רבים, את שנותי הלימינאליות ביותר, של המעבר מילד לאיש, כמו גם את השנים הליבידינאליות ביותר, העברתי במקום שהאימה הייתה חלק יומיומי שלו. לא יכולתי לקבל הסבר ממשי יותר לשורותיה של גולדברג מאשר המציאות ההיא. היום, כמו בכל טראומה, אינני זוכר את זה כמעט, כל־כך נוח לנוח בקרבת נועם האייפונים והפייסבוק.

בתקופה הקצרה הזו נהרגו למעלה מ־300 מאזרחי העיר. הרבה מהחברים שלי לא עלו על אוטובוסים עוד שנים ארוכות אחרי שהטרור שכך. אני הייתי מהבודדים שגם בגיל 13 עלו על אוטובוסים, ובדרכי יצא לי לא אחת לעבור על שרידים אימתניים של אוטובוסים שרופים. בבית־הספר הוקם מערך טלפוני, שהתקשר בכל בוקר של פיגוע (והפיגועים היו כמעט תמיד בבוקר) לכל ילד לא נוכח. אמי ואני כבר היינו מתורגלים לשמוע את צופרי האמבולנסים העוברים בדרכם לבית־החולים הדסה עין כרם, ועל־פי זה היינו מדליקים את הטלוויזיה לשמוע חדשות.

ואחרי כל זה אני שואל את עצמי, מהי הברית שלי עם המקום הזה? האם זוהי באמת ברית עם המוות? ומה עם מאות־אלפי האזרחים שנוסעים בתחבורה הציבורית הזו, המתחדשת בלי להתחדש, בכל יום? לא לא, האנשים האלה מראים בכל יום, שלמרות כל האלימות, ישנה בתוך הקרונות והאוטובוסים העלובים האלה ערבות לחיים. אולי לא לאהבה, אבל כן לחיים.

מאז שהרכבת התחילה את פעילותה הרשמית וגם לגבות תשלום, לא נראתה שום תנודה המבשרת על שינוי במערך התוואים ושירותם לאזרח: אזרחים ותיקים נאלצים לשלם מחיר רגיל, כי אין במכונות הכרטיסים שבתחנות אפשרות אחרת; הרבה פעמים המכונות עצמן מקולקלות. שלוש פעמים יצא לי להגיע לתחנה ולראות על הצג שישנן עוד 25 דקות עד להגעת הרכבת הבאה. כן, בלי בושה ובלי להרגיש כמה זה מגוחך להראות בצג המודרני, שממש כמו תמיד, הציפייה הולכת להיות ארוכה...

באוטובוסים לא מדובר בדקות רבות של המתנה כמו כאן, אלא בעמידה וציפייה בלי ידיעת הזמן ל"עוד נצח אחד". ובכל זאת, יצא לי להגיע לרכבת באמצע היום ולראות שכתוב על הצג "אין שירות", בלי שום אינדיקציה למתי הוא יחזור. ומה עשו אזרחינו אנשי שלומנו? המתינו. ובהמוניהם. בהתחלה התקצפתי ולחצתי על כפתור החירום, ואחרי חמש דקות תמימות של המתנה, כשברקע חזר התקליט:

Please wait; you will be immediately connected with an emergency service

נמלאתי חימה וחשבתי על מקרה חירום ממשי, שבו מישהו היה זקוק לעזרה... כמובן שאף אחד לא ענה לי.

אבל אז, כשפניתי למבוגר אחד ואמרתי לו, "למה בדיוק אתם מחכים?" והוא ענה, "מי יודע, אולי היא תבוא...", הבנתי שעוד לא השלמתי מספיק עם גדולתה של הציפייה הדוממת של עירי. כמו הגשם שלא בא, ולא בא עוד מימי התנ"ך, ירושלים מצפה.

ואולי זו גדולתה של האהבה גם, הממתיקה את התשוקה והרצון אל עבר הציפייה הנופית העומדת? אהבה שהיא בעצמה תבונה של זיקנה? אהבה את המקום? את החיים?

"אמרתי לה, מפני מה היית שמחה ואחר־כך עצובה ועכשיו שוב את שמחה. אמרה בלשון חיבה, אם אין אתה מקפיד אומר לך, לא כך היית צריך לשאול, אלא במה זכית שהסיר אלקים את יגונך. שהשם יתברך הכול שווה בעיניו, כשמחה כעצבות" (**"תהלה"**).

עמרי בן יהודה הוא דוקטורנט במרכז ללימודים גרמניים של "פורום אירופה" באוניברסיטה העברית. עבודת הדוקטורט שלו עוסקת בספרות גרמנית ועברית